

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Antun Jugović**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil, dipl. ing. stroj.

Student:

Antun Jugović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Mislavu Čehilu dipl. ing. stroj. na stručnoj pomoći i ustupljenom vremenu tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Stjepku Katuliću dipl. ing. stroj. na velikoj pomoći i konzultacijama tijekom izrade rada, te pruženom stručnom znanju.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji, prijateljima i kolegama koji su mi pružili veliku pomoć tijekom studiranja bez kojih moje obrazovanje ne bi bilo moguće.

Antun Jugović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antun Jugović** Mat. br.: 0035183386

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Modeliranje kombiniranog Brayton-ORC Rankine postrojenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Modeling of combined Brayton-Organic Rankine cycle system**

Opis zadatka:

Kod plinskoturbinskog postrojenja dimni plinovi se, nakon ekspanzije u plinskoj turbini, ispuštaju u okoliš. Budući da je temperatura dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine osjetno viša u odnosu na temperaturu okoliša, postoji mogućnost dodatnog iskorištavanja topline dimnih plinova primjenom organskih radnih medija.

U radu je potrebno u programskom paketu Matlab izraditi matematički model kombiniranog plinskoturbinskog i parnoturbinskog postrojenja gdje će u parnoturbinskom dijelu postrojenja radni medij biti voda odnosno organski fluid. Potrebno je izvršiti detaljnu analizu kako odabir radnog medija utječe na termodinamičku iskoristivost kombiniranog postrojenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Zadatak zadao:

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Predsjednica Povjerenstva:

doc. dr. sc. Mislav Čehil

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMBINIRANA POSTROJENJA.....	2
2.1. Općenito o kombiniranim postrojenjima .....	2
2.2. Braytonov ciklus .....	4
2.3. Rankineov ciklus.....	6
3. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS .....	8
3.1. Općenito o Organskom Rankineovom ciklusu .....	8
3.2. Primjena Organskog Rankineovog procesa .....	8
3.2.1. ORC na otpadnu toplinu .....	8
3.2.2. Geotermalne elektrane .....	8
3.2.3. Solarne termalne elektrane.....	9
3.2.4. Elektrane na biomasu .....	9
3.3. Radni mediji u ORC.....	10
3.3.1. Toluen .....	11
3.3.2. Aceton .....	11
3.3.3. Cikloheksan.....	11
4. MATEMATIČKI MODEL KOMBINIRANOG POSTROJENJA .....	12
4.1. Matematički model plinsko-turbinskog postrojenja .....	14
4.2. Matematički opis ORC.....	17
5. ANALIZA REZULTATA .....	20
5.1. Toluen kao radni medij u ORC-u.....	20
5.2. Aceton kao radni medij u ORC-u .....	31
5.3. Cikloheksan kao radni medij u ORC-u .....	39
6. ZAKLJUČAK.....	46
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	48

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema kombiniranog postrojenja.....	2
Slika 2. T-s dijagram kombiniranog postrojenja.....	3
Slika 3. Shema Braytonovog ciklusa.....	4
Slika 4. T-s dijagram Braytonovog ciklusa.....	5
Slika 5. Shema Rankineovog ciklusa[6] .....	6
Slika 6. T-s dijagram Rankineovog ciklusa[7] .....	7
Slika 7. Shema ORC postrojenja koje za gorivo koristi biomasu[8] .....	9
Slika 8. T-s dijagrami za mokre, izentropske i suhe tekućine [9] .....	10
Slika 9. Shema kombiniranog postrojenja.....	13
Slika 10. T-s dijagram Braytonovog ciklusa.....	14
Slika 11. T-s dijagram ORC-a.....	17
Slika 12. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (toluen).....	20
Slika 13. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen) .....	21
Slika 14. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen).....	22
Slika 15. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (toluen) .....	24
Slika 16. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (toluen).....	25
Slika 17. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen) .....	26
Slika 18. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen).....	27
Slika 19. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (toluen) .....	27
Slika 20. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (toluen) ...	28
Slika 21. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (toluen) .....	29
Slika 22. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (toluen) .....	30
Slika 23. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (acetone).....	31
Slika 24. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone).....	32
Slika 25. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone) .....	32
Slika 26. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (acetone).....	33
Slika 27. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (acetone).....	34
Slika 28. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone).....	34
Slika 29. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone) .....	35

Slika 30. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (aceton).....	36
Slika 31. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (aceton) ...	36
Slika 32. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (aceton) .....	37
Slika 33. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (aceton) .....	38
Slika 34. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan) ...	39
Slika 35. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan) .....	40
Slika 36. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan).....	40
Slika 37. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (cikloheksan) .....	41
Slika 38. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan) .	41
Slika 39. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan) .....	42
Slika 40. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan).....	43
Slika 41. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (cikloheksan) .....	43
Slika 42. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (cikloheksan) .....	44
Slika 43. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (cikloheksan) .....	45
Slika 44. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (cikloheksan) .....	45

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Ulazne varijable matematičkog modela .....	13
---	----



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$\eta$	-	termodinamička iskoristivost
$\varepsilon$	-	kompresijski omjer
$\dot{Q}$	kW	toplinski tok
$h$	kJ/kg	specifična entalpija
$P$	kW	snaga
$T$	K	temperatura
$p$	bar	tlak
$q_m$	kg/s	maseni protok
$W$	J	rad

**POPIS KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
<i>B</i>	braytonov proces
<i>D</i>	dovedeno u dogrijavanju
<i>Dov</i>	ukupno dovedeno
<i>E</i>	ekonomajzer
<i>Isp</i>	isparivač
<i>is</i>	izentropski
<i>K</i>	kompresor
<i>KI</i>	komora izgaranja
<i>Kombi</i>	kombinirani proces
<i>Kond</i>	kondenzator
<i>ORC</i>	Organski Rankineov ciklus
<i>P</i>	pumpa
<i>pp</i>	pinch točka
<i>r</i>	Rankineov ciklus
<i>Tur</i>	turbina
<i>ul</i>	na ulazu

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisan je i analiziran kombinirani proces u kojemu se otpadna toplina iz plinsko-turbinskog ciklusa koristi kao ogrjevni spremnik za potrebe parno-turbinskog Organskog Rankineovog ciklusa. Nakon opisa osnovnih kružnih procesa, objašnjen je Organski Rankineov ciklus i specifikacije radnih medija koje se koriste. Matematičkim modelom opisan je Braytonov proces s dvostupanjskom kompresijom i dvostupanjskom ekspanzijom te Organski Rankineov ciklus. Analiza rezultata pokazuje kako vrsta radnog medija, temperatura na ulazu u plinsku turbinu i tlak u Organskom Rankineovom ciklusu utječu na termodinamičku iskoristivost kombiniranog postrojenja.

Ključne riječi: Braytonov ciklus, Organski Rankineov ciklus, kombinirani ciklus

## **SUMMARY**

Within the scope of this Master Thesis a combined cycle is described and analyzed in which waste heat from a gas turbine cycle is used as a heating reservoir for the steam turbine organic Rankine cycle. Brayton and the organic Rankine cycle are described as well as the properties of the organic fluid which are used as working fluids. A mathematical model is made for the organic Rankine cycle and a two stage compressor and turbine Brayton cycle. The analysis of results show how the type of working fluid, the inlet temperature in the gas turbine and the pressure in the organic Rankine cycle influence the thermodynamic efficiency of the combined cycle.

Key words: Brayton cycle, Organic Rankine cycle, combined cycle

## 1. UVOD

Potrebe za energijom rastu, stoga se javljaju izazovi kako zadovoljiti potražnju za njom. S druge strane ekološki izazovi, kao što su globalno zatopljenje, su aktualni predmet znanstvenih rasprava. Kao jedna od mjera smanjenja globalnog zatopljenja je korištenje obnovljivih izvora energije za dobivanje električne energije. Iako je udio električne energije dobivene iz obnovljivih izvora u porastu i dalje postrojenja koja koriste fosilno gorivo zauzimaju značajan postotak u ukupnoj proizvodnji električne energije. Skupa tehnologija i ovisnost o meteorološkim prilikama predstavljaju glavne prepreke za energetske tranzicije ka obnovljivim izvorima energije. Stoga se pribjegava povećanju termodinamičke iskoristivosti postrojenja koja proizvode električnu energiju iz fosilnih goriva. Takva postrojenja nazivamo termoelektranama a dijelimo ih na:

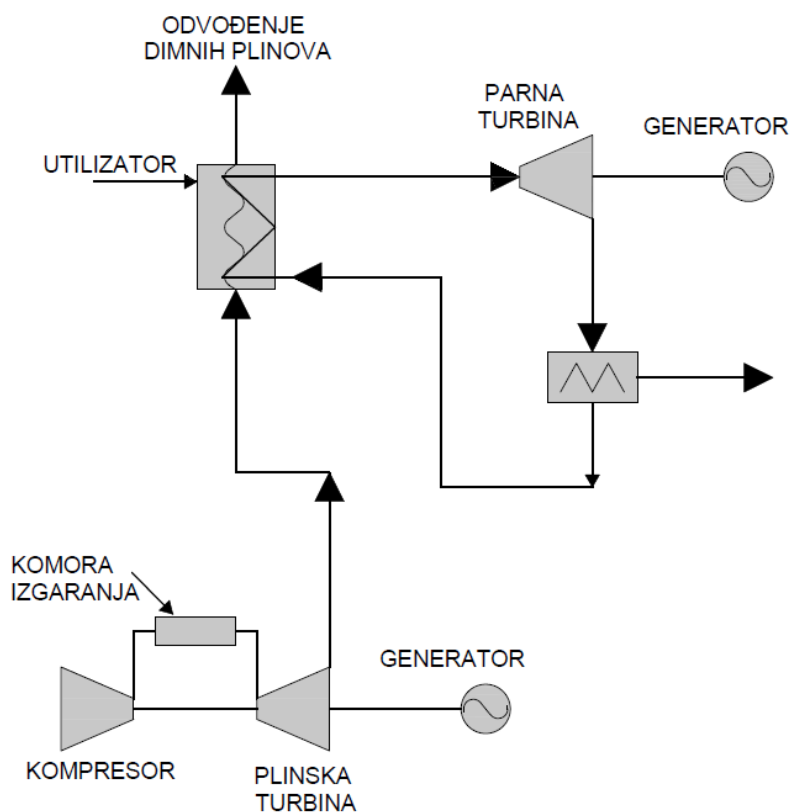
- parno-turbinske termoelektrane,
- plinsko-turbine termoelektrane,
- kombinirane termoelektrane,

Upravo potonja predstavljaju optimalno rješenje kada je riječ o povećanju termodinamičke iskoristivosti. U ovom radu opisan je kombinirani proces u kojemu se otpadna toplina iz plinsko-turbinskog Braytonovog ciklusa iskorištava za potrebe Organskog Rankineovog parno-turbinskog ciklusa. Organski Rankineov ciklus predstavlja idealno rješenje kada je riječ o iskorištavanju otpadne topline pri nižim temperaturama. Specifičnost organskih radnih medija jest u tome što imaju vrlo niske kritične temperature pa otpadni dimni plinovi, temperatura do 600 °C, predstavljaju prihvatljiv izvor topline. Implementacijom Organskog Rankineovog ciklusa u kombinirano postrojenje ukupna termodinamička iskoristivost se povećava. [4]

## 2. KOMBINIRANA POSTROJENJA

### 2.1. Općenito o kombiniranim postrojenjima

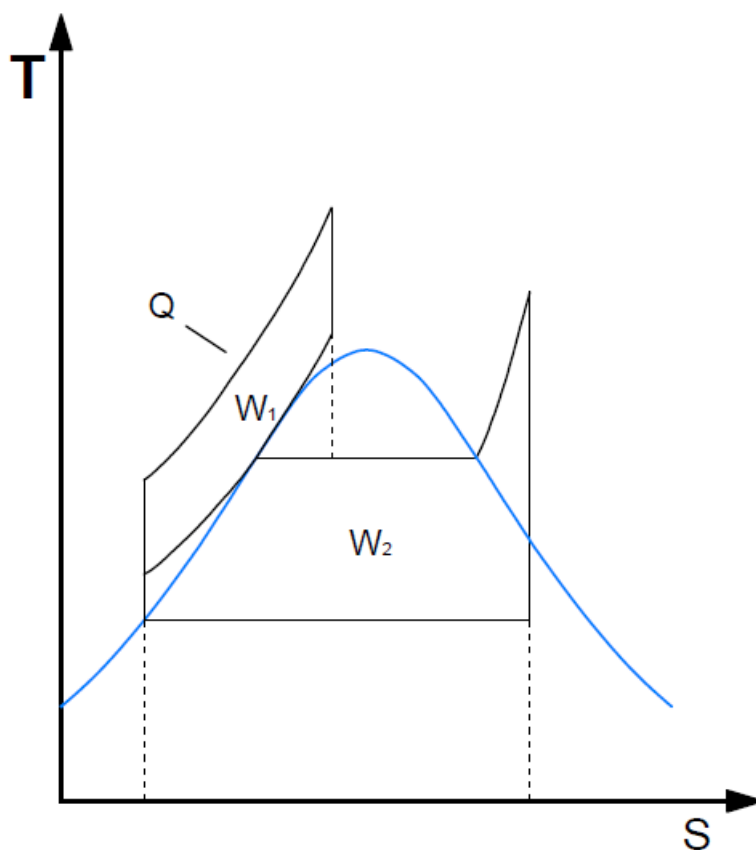
Kombinirana postrojenja su ona postrojenja koja u plinsko-turbinskom i parno-turbinskom procesu proizvode mehanički rad kojime je pogonjen električni generator. Osnovna namjena i cilj kombiniranih postrojenja jest iskorištavanje otpadne topline dimnih plinova iz plinsko-turbinskog dijela postrojenja. Dimni plinovi na ulazu u plinsku turbinu najčešće dosežu temperature u rasponu od 1200 °C do 1500 °C, a na izlazu iz turbine oko 600 °C. Ispuštanje dimnih plinova tako visoke temperature u okoliš predstavlja veliki termodinamički gubitak. Kako bi se ti gubici izbjegli, otpada topline dimnih plinova koristi se kao izvor topline u parno-turbinskom ciklusu. [2]



Slika 1. Shema kombiniranog postrojenja

U plinsko-turbinskom ciklusu (Braytonov proces) izgaranjem mješavine plinskog goriva i zraka nastaju dimni plinove visoke temperature koji na izlazu iz plinske turbine i dalje imaju visoku temperaturu. Po izlasku iz plinske turbine, dimni plinovi se šalju u generator pare na

otpadnu toplinu. Para proizvedena u generatoru pare ulazi u parnu turbinu gdje ekspandira te predaje mehanički rad generatoru električne energije. Ovakvim kombiniranim procesom (Slika 1.) uvelike se povećava termodinamička iskoristivost postrojenja koja može doseći i preko 60%. [3]



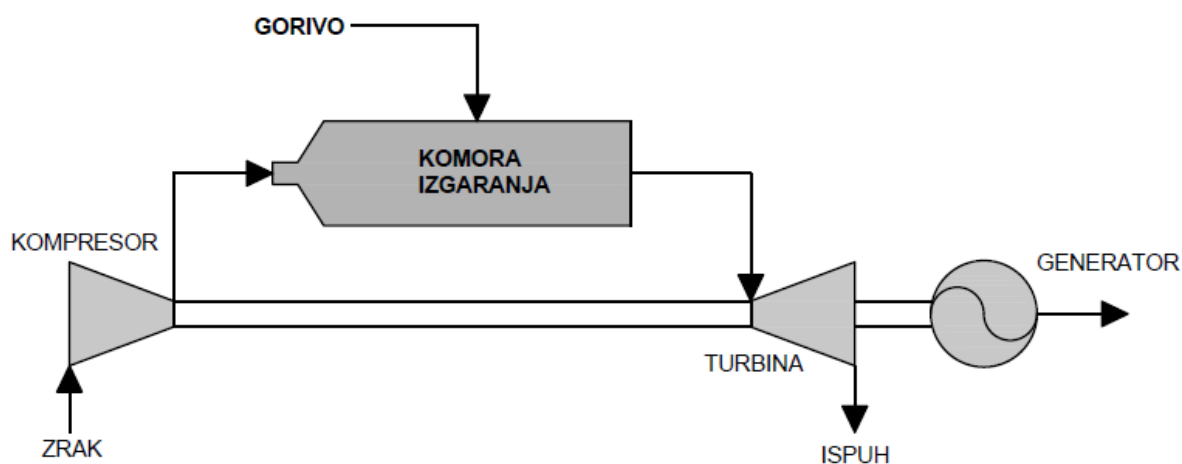
Slika 2. T-s dijagram kombiniranog postrojenja

Dobiveni rad kombiniranog ciklusa (Slika 2.) jednak je zbroju radova generiranih u plinsko-turbinskom postrojenju ( $W_1$ ) i parno-turbinskom postrojenju ( $W_2$ ). Toplina dovedena u kombiniranom ciklusu jednaka je toplini dovedenoj u plinsko-turbinskom ciklusu (toplina dovedena gorivom) ( $Q$ ), dok je ukupna termodinamička iskoristivost kombiniranog ciklusa ( $\eta_{kc}$ ) jednaka:

$$\eta_{Kombi} = \frac{W_1 + W_2}{Q} \quad (2.1)$$

## 2.2. Braytonov ciklus

Plinsko-turbinski ciklus u kombiniranom postrojenju opisan je Braytonovim ciklusom. Braytonov ciklus je idealni proces koji služi kao polazišna točka pri proračunu plinsko-turbinskih postrojenja. U termodinamičkom smislu, proces se odvija između dvije izobare i dvije izentrope. Shema postrojenja koje se sastoji od kompresora, ogrjevnog spremnika, plinske turbine i rashladnog spremnika kao što je prikazano na slici 3. U stvarnosti komora izgaranja zamjenjuje ogrjevni spremnik a dimni plinovi po izlasku iz turbine ispuštaju se u okoliš ili daljnje iskorištavanje u nekom drugom procesu.

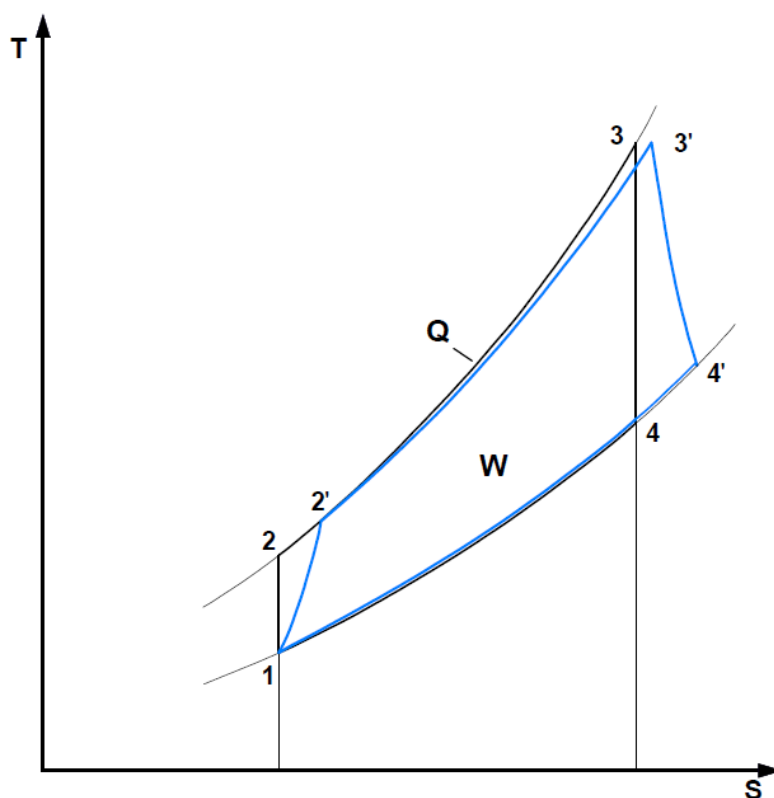


Slika 3. Shema Braytonovog ciklusa

Princip rada Braytonovog procesa je takav da se prvo zrak tlaka  $p_1$  i temperature  $T_1$  komprimira na zadani tlak  $p_2$ , koji je i najveći tlak kružnog procesa plinske turbine i na temperaturu  $T_2$ . U realnom plinsko-turbinskom procesu ova promjena stanja zraka nije izentropska, kao što je u slučaju Braytonovog ciklusa, zbog gubitaka u kompresoru uzrokovanih turbulencijama i trenjem. Komprimirani zrak stanja 2 zatim se odvodi u komoru izgaranja gdje se miješa s plinovitim gorivom te izgara. U idealnim uvjetima ova promjena bila bi izobarna, ali zbog trenja događa se mali pad tlaka. Nakon procesa izgaranja dimni plinovi temperature  $T_3$  i tlaka ( $p_3$ ) ekspandiraju u plinskoj turbini predajući okretni moment vratilu turbine. Procesom u plinskoj turbini toplinska energija se pretvara u mehaničku.



Dobivena mehanička energija koristi se za pogon električnog generatora i za pogon kompresora. Zbog trenja u plinskoj turbini proces nije izentropski. Nakon izlaska iz turbine dimni plinovi tlaka  $p_4$  i temperature  $T_4$  se ispuštaju u okoliš u slučaju mlaznih motora, dok se kod plinskih turbina u elektro-energetskim postrojenjima otpadna toplina sadržana u dimnim plinovima stanja 4 iskorištava u daljnjim procesima kombiniranog postrojenja kako je već prethodno navedeno. Slika 4. prikazuje promjene stanja zraka i dimnih plinova u T-s dijagramu.



Slika 4. T-s dijagram Braytonovog ciklusa

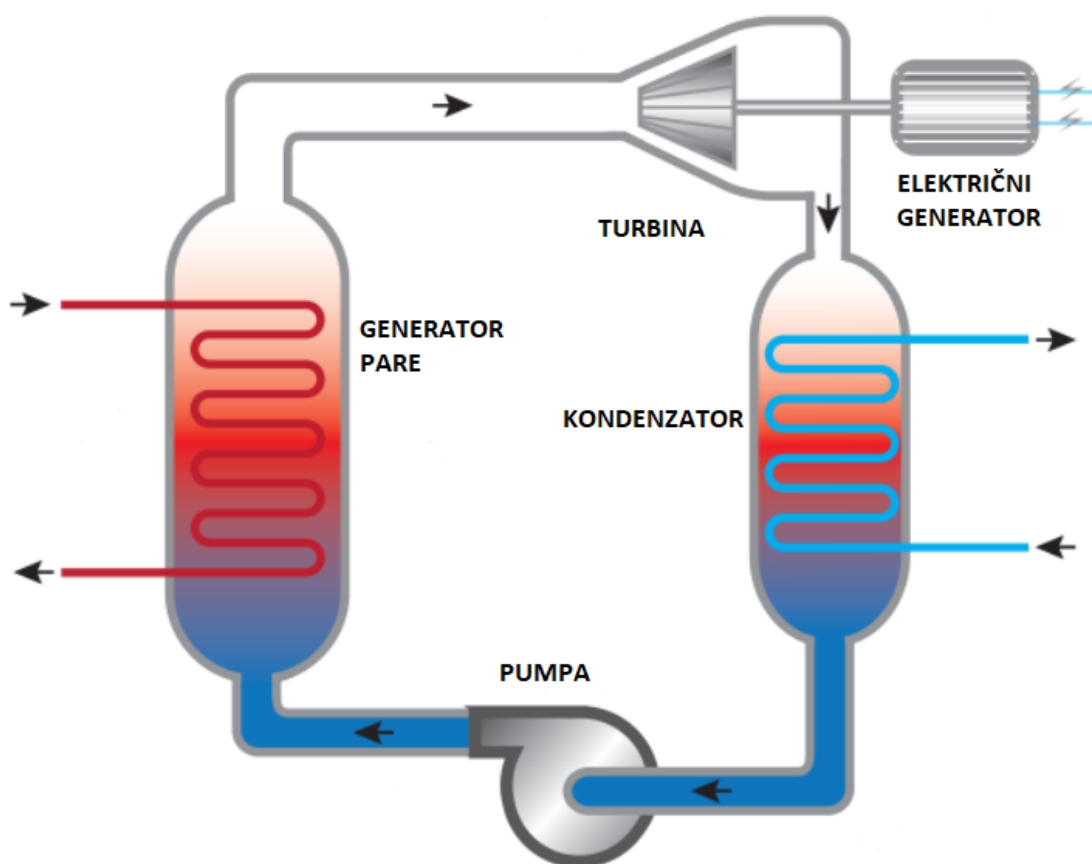
Termodinamička iskoristivost procesa ( $\eta_B$ ) jednaka je omjeru dobivenog rada ( $W$ ) i dovedene topline  $Q$ . Termodinamička iskoristivost Braytonovog procesa se također može izraziti i preko temperature prije ulaska u kompresor  $T_1$  i temperature nakon izlaska iz kompresora  $T_2$ . [5]

$$\eta_B = \frac{W}{Q} \quad (2.2)$$

$$\eta_B = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (2.3)$$

### 2.3. Rankineov ciklus

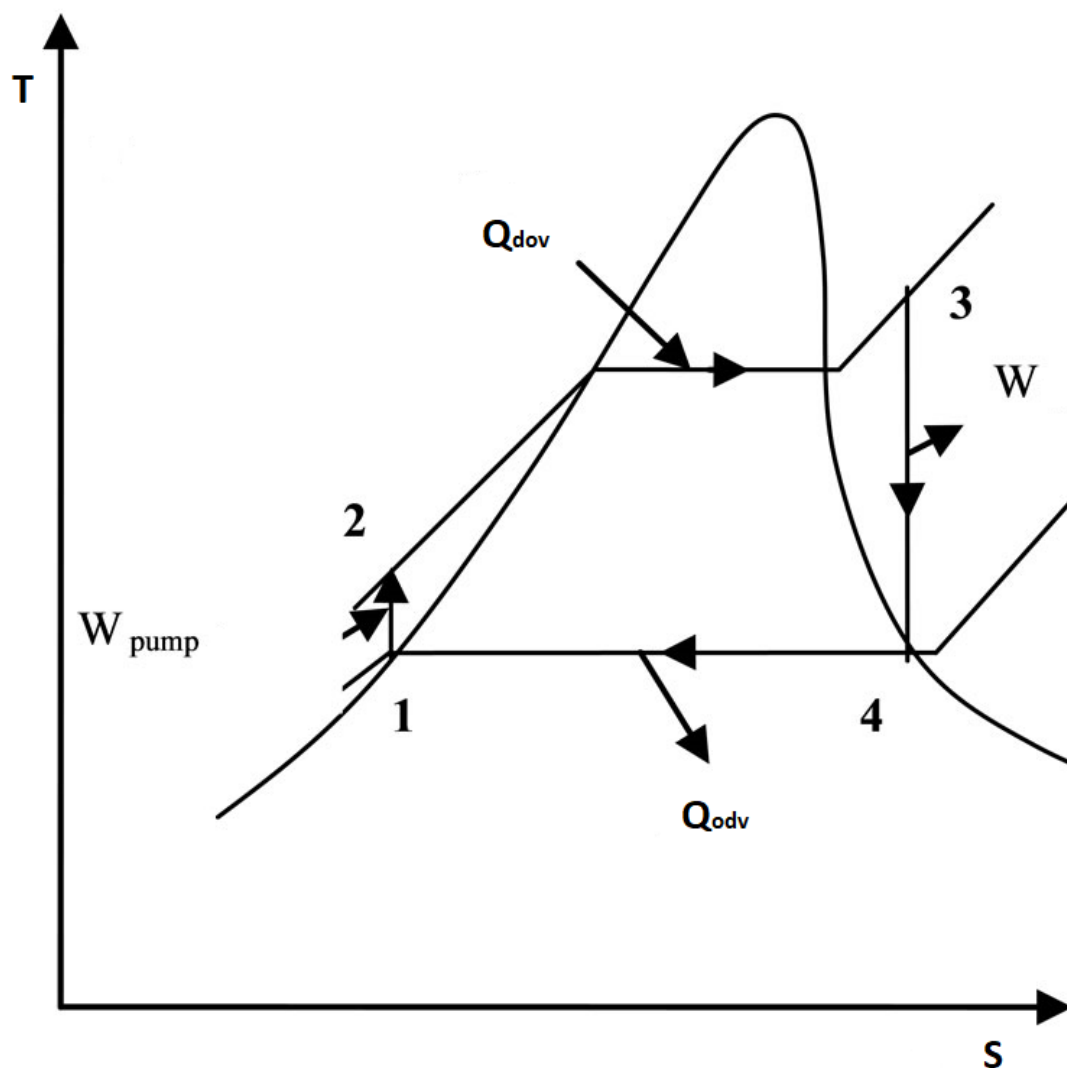
Rankineov ciklus je termodinamički proces koji pretvara toplinsku energiju u koristan rad. To je ujedno i kružni proces na kojemu se zasniva rad parno-turbinskih postrojenja. Prema njemu se računaju izmijenjeni toplinski tokovi, termodinamička iskoristivost i generirana snaga takvih procesa. Kako bi se povećala termodinamička iskoristivost procesa, uvedene su mnoge modifikacije u Rankineov ciklus, međutim ovdje će biti opisan osnovni proces (Slika 5.).



Slika 5. Shema Rankineovog ciklusa[6]

Glavni dijelovi postrojenja su: generator pare, parna turbina, generator električne energije, kondenzator i napojna pumpa. Proces se odvija tako što se voda pri konstantnom tlaku u generatoru pare pregrijava na visoku temperaturu nakon čega ulazi u parnu turbinu. Ekspanzijom pare u turbini generira se koristan rad na vratilu koje pogoni električni generator.

Nakon ekspanzije pare u turbinu do kondenzatorskog tlaka kondenzat se napojnom pumpom odvodi natrag u generator pare.



Slika 6. T-s dijagram Rankineovog ciklusa[7]

Slika 6 prikazuje Rankineov ciklus u T-s dijagramu. Napojna pumpa dobavlja vodu stanja 1 do stanja 2 nakon čega u generatoru pare te pregrijaču nastaje pregrijana para stanja 3. Vodena para stanja 3 ulazi u parnu turbinu te ekspankira do kondenzatorskog tlaka  $p_4$ . Termodinamička iskoristivost procesa jednaka je omjeru dobivenog rada koji je jednak razlici entalpija u 3 i 4, te dovedene topline koja je jednaka razlici entalpija u točkama 3 i 2. [5]

### 3. ORGANSKI RANKINEOV CIKLUS

#### 3.1. Općenito o Organskom Rankineovom ciklusu

Organski Rankineov Ciklus (ORC) radi na istom principu kao i klasični Rankineov ciklus ali za radni medij koristi organsku tvar umjesto vode. Glavna značajka organskih tvari jest da imaju nižu temperaturu zasićenja od vode pa time zahtijevaju i nižu temperaturu ogrjevnog spremnika. Organski Rankineov proces pogodan je za rješenja kada je temperatura ogrjevnog spremnika od 80 °C do 350 °C. [1]

#### 3.2. Primjena Organskog Rankineovog procesa

ORC je unazad nekoliko godina postao vrlo primjenjiva tehnologija te je instalirano nešto više od 2,7 GW širom svijeta [1]. Kako se pretvorba toplinske u električnu energiju vrši pri niskim temperaturama, ORC se smatra ekološki prihvatljivim procesom te se očekuje još veća njegova primjena u budućnosti. Najčešća primjena ORC-a je u:

- iskorištavanje otpadne topline iz drugih procesa,
- geotermalne elektrane,
- solarne termalne elektrane,
- elektrane na biomasu.

##### 3.2.1. ORC na otpadnu toplinu

Iskorištavanje otpadne topline iz drugih procesa, kao što je parno-turbinski ciklus u plinskoj termoelektrani, najčešći je oblik uporabe ORC-a. Otpadna toplina iz plinsko-turbinskog ciklusa iskorištava se kao ogrjevni spremnik ORC-a. Takav oblik postrojenja naziva se kombinirano postrojenje kao što je već prethodno objašnjeno. Analiza jednog takvog kombiniranog procesa je i tema ovog rada.

##### 3.2.2. Geotermalne elektrane

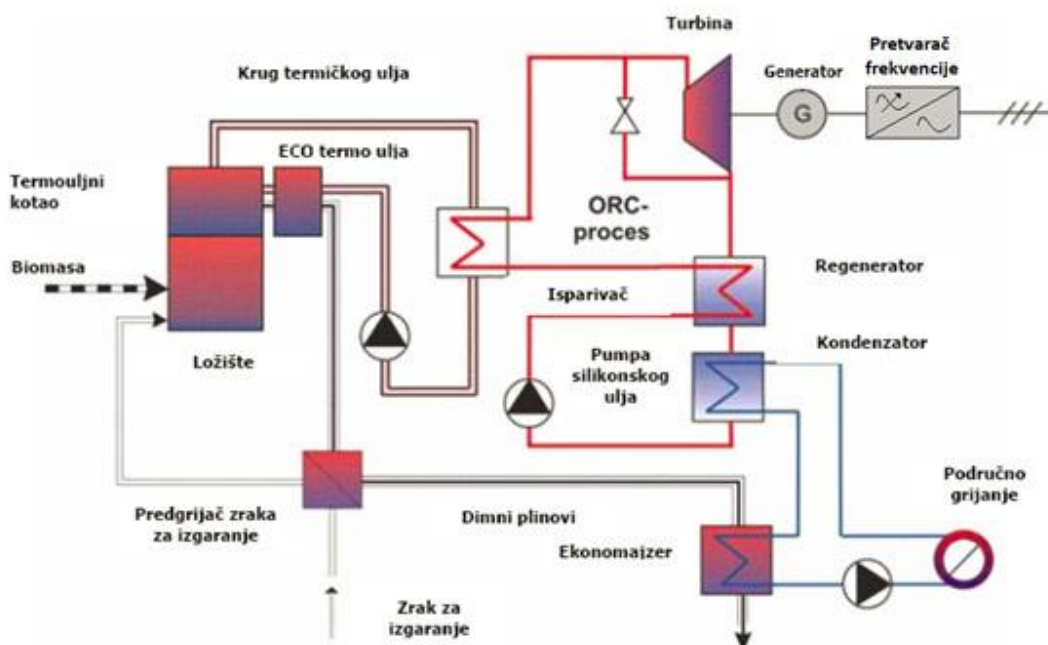
Temperatura vode iz geotermalnih izvora varira između 50 °C i 350 °C što predstavlja idealan izvor topline za ORC. Za geotermalne izvore s temperaturom vode nižom od 100 °C termodinamička iskoristivost procesa je niska te je upitna isplativost izgradnje.

### 3.2.3. Solarne termalne elektrane

Solarne termalne elektrane su izvori električne energije koje pretvaraju solarnu energiju prvo u toplinsku koja se kasnije koristi u nekom kružnom procesu za generiranje električne energije. Vrste solarnih termalnih elektrana dijele se prema zrcalima i cjelokupnoj izvedbi pa tako razlikujemo: parabolične kolektore, solarne tornjeve, solarne tanjure, fresnel reflektore i solarne uzgonske elektrane. Najčešći kružni proces koji vrši pretvorbu toplinske u električnu energiju jest upravo ORC.

### 3.2.4. Elektrane na biomasu

Iako je biomasa najraširenije gorivo na Zemlji te se može koristiti za male i srednje elektrane, problem predstavljaju visoki investicijski troškovi poput generatora pare. Stoga Organski Rankineov Ciklus predstavlja idealno rješenje tog problema zbog niskog radnog tlaka. Prednost je također dug radni vijek postrojenja zbog karakteristika radne tvari koje ne erodiraju i ne uzrokuju koroziju cijevi, ventila i turbine. Na slici 7 prikazana je shema ORC postrojenja koje koristi biomasu kao gorivo. [1]

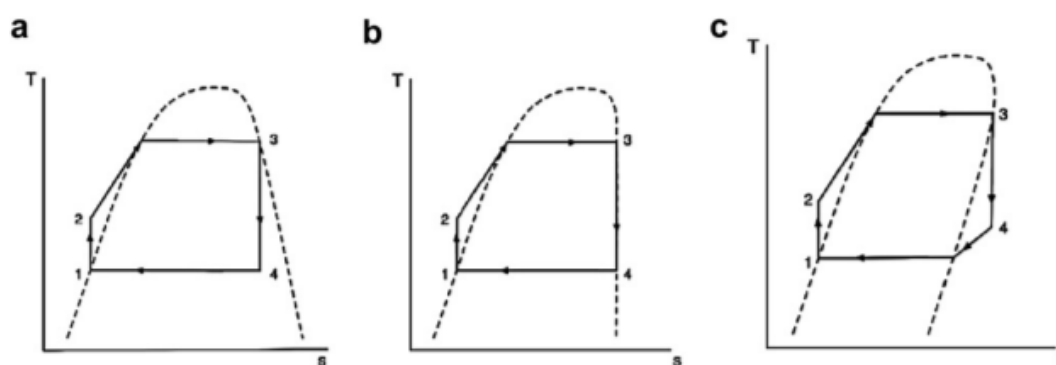


Slika 7. Shema ORC postrojenja koje za gorivo koristi biomasu[8]

### 3.3. Radni mediji u ORC

Specifičnost Organskog Rankineovog Ciklusa je upravo ta što radni medij nije voda već neka organska tvar. Prema temperaturi ogrjevnog spremnika određuje se odgovarajuća organska tvar za radni medij. Organske radne medije možemo podijeliti u tri skupine (Slika 8):

- Mokre fluide – imaju negativan nagib krivulje koja označava stanje suhozasićene pare u T-s dijagramu te također ih odlikuje mala molarna masa
- Izentropske fluide – imaju skoro vertikalnu krivulju koja označava stanje suhozasićene pare u T-s dijagramu, a obično su srednje molarne mase
- Suhe fluide – imaju pozitivan nagib linije koja označava stanje suhozasićene pare u T-s dijagramu te su uglavnom tvari velike molarne mase [9]



Slika 8. T-s dijagrami za mokre, izentropske i suhe tekućine [9]

Kako se ORC koristi za različite vrste postrojenja, tako i izbor radne tvari varira radi li se o postrojenjima na biomasu, geotermalnim postrojenjima ili solarno termalnim postrojenjima. Neki od kriterija za izbor radne tvari u ORC postrojenju su:

- temperature ogrjevnog spremnika iz kojega će se dovoditi toplina procesu,
- termodinamičkim svojstvima radne tvari,
- sigurnosnim zahtjevima: korozijska reakcija s materijalom postrojenja, nezapaljivost, netoksičnost,
- isplativost i životni vijek.

Za potrebe simulacije postrojenja koje će analizirati u ovom radu izabrani su radni mediji: toluen, aceton i cikloheksan.

### 3.3.1. Toluen

Toluen je aromatski ugljikovodik ( $C_7H_8$ ,  $C_6H_5CH_3$ ) koji je po svojstvima sličan benzenu. Bezbojna je zapaljiva tekućina ugodnoga mirisa, a temperatura vrelišta mu je  $111\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Izvor toluena jest nafta i kameni ugljen te se dobiva ekstrakcijom ili destilacijom benzina, suhom destilacijom kamenog ugljena i frakcijskom destilacijom katrana kamenog ugljena. Spada u skupinu suhih tekućina prema podjeli radne tvari u ORC-u. Toluen odlikuju vrlo dobra termodinamička svojstva ali je zapaljiv i otrovan.[10] Temperatura samozapaljenja iznosi  $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [11]

### 3.3.2. Aceton

Aceton je alifatski keton ( $C_3H_6O$ ). Bezbojna je, lako hlapljiva, zapaljiva tekućina i karakterističnog mirisa. Neki od načina dobivanja acetona su: suhom destilacijom kalcijeva acetata, dehidrogenacijom izopropanola i provođenjem octene kiseline i alkohola. Spada u skupinu suhih tekućina prema podjeli radne tvari u ORC-u.[10] Temperatura vrelišta mu je  $56.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a temperatura samozapaljenja  $465\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [11]

### 3.3.3. Cikloheksan

Cikloheksan je cikloalkan ( $C_6H_{12}$ ). Koristi se u kemijskoj industriji kao otapalo i kao sredstvo za uklanjanje boja i lakova. [10] Temperatura vrelišta mu je  $81\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a temperatura samozapaljenja  $245\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [11]

#### 4. MATEMATIČKI MODEL KOMBINIRANOG POSTROJENJA

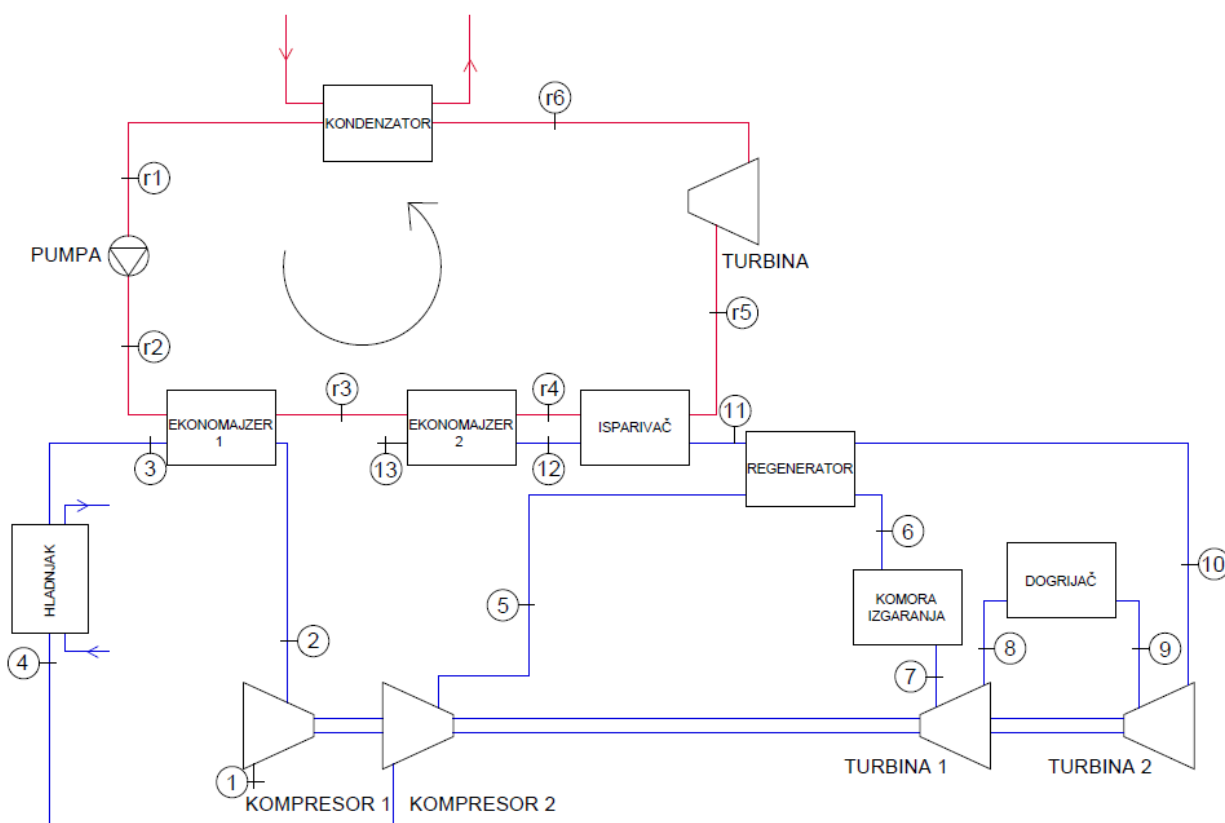
U ovom diplomskom radu napravljen je matematički model kombiniranog Brayton-ORC postrojenja. Matematički model napisan je u programskom paketu MATLAB. Model se sastoji od dva djela: Braytonovog plinsko-turbinskog i parno-turbinskog ORC ciklusa. Za radni medij u plinsko-turbinskom djelu odabran je zrak kao radna tvar, dok se kao radna tvar u ORC ciklusu koriste organski fluidi: toluen, aceton i cikloheksan. Termodinamička svojstva radnih tvari računata su pomoću NIST REFPROP kalkulatora kojeg je moguće implementirati u Matlab program.

U Braytonovom ciklusu okolišni zrak stanja  $p_1$  i  $T_1$  komprimira se adijabatski u prvom stupnju kompresora do tlaka  $p_2$ , nakon čega se hladi do temperature  $T_3$  predajući toplinu pri konstantnom tlaku radnom mediju ORC procesa u ekonomajzeru 1. Daljnjim hlađenjem u hladnjaku zrak se dovodi na temperaturu  $T_4$ . Zrak zatim ulazi u drugi stupanj kompresora gdje se adijabatski komprimira na radni tlak  $p_2$ . Prije ulaska u komoru izgaranja, zrak se zagrijava u regeneratorskom do temperature  $T_6$ . Zrak po izlasku iz komore izgaranja temperature  $T_7$  ulazi u prvi stupanj plinske turbine te ekspanzira do tlaka  $p_8$  i temperature  $T_8$ , nakon čega se dogrijava ponovno do temperature  $T_9$  koja je jednaka temperaturi  $T_7$ . Nakon ekspanzije u drugom stupnju plinske turbine zrak se hladi do temperature  $T_{13}$  predajući toplinu ORC procesu kroz ekonomajzer 2 i isparivač.

Organski Rankineov Ciklus sastoji se od napojne pumpe, dva ekonomajzera, isparivača, turbine te kondenzatora. Radna medij stanja 1 ulazi u napojnu pumpu koja ga komprimira na tlak  $p_{r2}$ . Radni medij, stanja 2, zagrijava se u prvo u ekonomajzeru 1 do temperature  $T_{r3}$ , a nakon toga i do temperature zasićenja  $T_{r4}$  u ekonomajzeru 2. Radni medij zatim ulazi u isparivač pri čemu dolazi do stanja suhozasićene pare. Nakon toga medij ekspanzira u parnoj turbini do tlaka  $p_{r6}$  koji je jednak tlaku  $p_{r1}$ , pri čemu se generira koristan rad. Pregrijana para stanja 6 kondenzira do temperature  $T_{r1}$  predajući toplinu rashladnom mediju u kondenzatoru. Shema kombiniranog procesa prikazana je na slici 8.

Rankineov Organski ciklus služi kao rashladni spremnik te iskorištava otpadnu toplinu iz Braytonovog ciklusa pa time povećava ukupnu termodinamičku iskoristivost postrojenja. Iz sheme je vidljivo koja su to energetska stanja gdje dolazi do izmijene topline između dva ciklusa. U tablici 1. dani su ulazni radni parametri postrojenja.





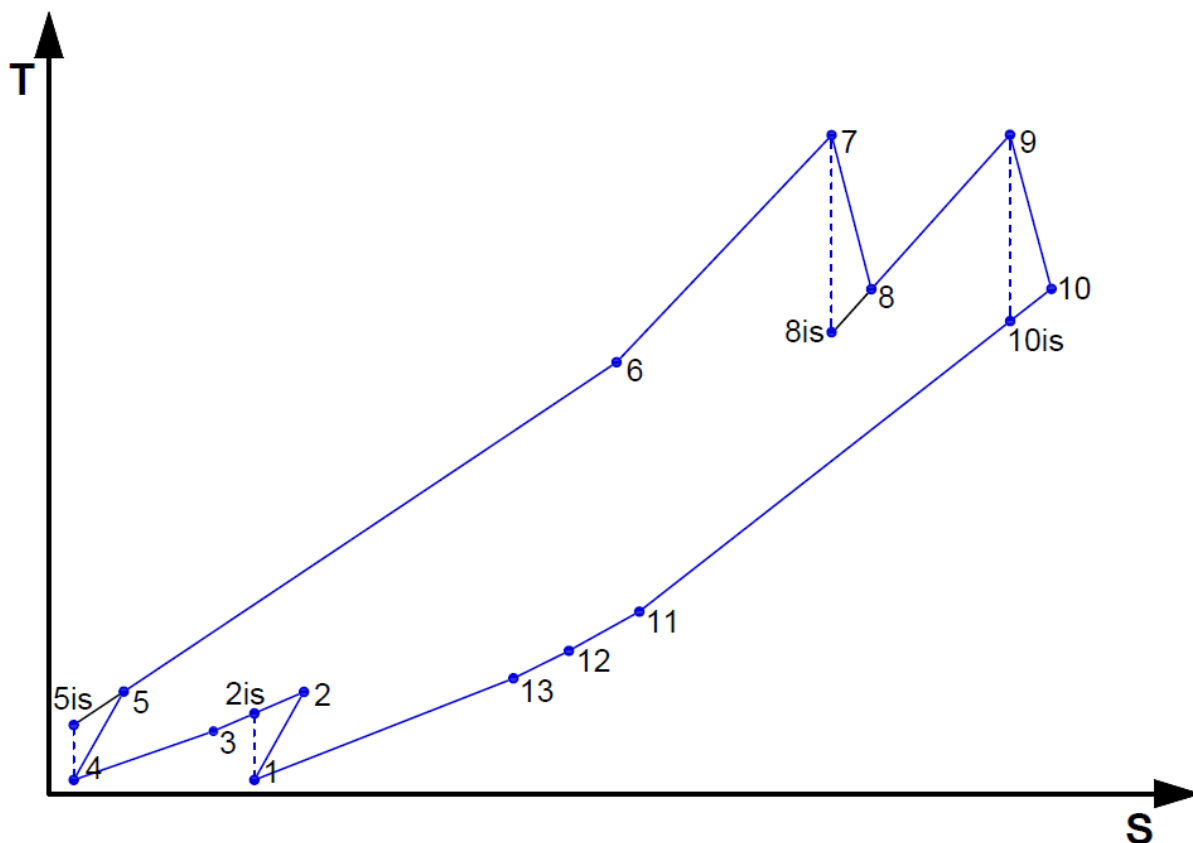
Slika 9. Shema kombiniranog postrojenja

Tablica 1. Ulazne varijable matematičkog modela

Varijable	Iznos
Temperatura na ulazu u prvi stupanj kompresora $T_1$	25 °C
Tlak na ulazu u prvi stupanj kompresora $p_1$	1 bar
Kompresijski stupanj prvog stupnja kompresora $\varepsilon_1$	3
Kompresijski stupanj drugog stupnja kompresora $\varepsilon_2$	5
Iskoristivost kompresora u Braytonovom ciklusu $\eta_K$	75%
Iskoristivost turbine u Braytonovom ciklusu $\eta_{Tur}$	80%
Iskoristivost regeneratora $\eta_{Reg}$	80%
Efikasnost napojne pumpe u ORC-u $\eta_{P,ORC}$	80%
Efikasnost turbine u ORC-u $\eta_{Tur,ORC}$	80%
Temperaturna razlika u ORC ekonomajzeru i Braytonovom hladnjaku $T_2 - T_{r3}$	10 °C

#### 4.1. Matematički model plinsko-turbinskog postrojenja

U ovome poglavlju bit će opisane polazne jednačbe koje su korištene za izradu matematičkog modela plinsko-turbinskog ciklusa. Slika 10. predstavlja opis ciklusa u T-s dijagramu. Maseni protok radnog medija uzet je kao jedinični (1 kg/s).



Slika 10. T-s dijagram Braytonovog ciklusa

Tlak u točki 2 izračunava se preko kompresijskog omjera prema sljedećoj jednačbi:

$$\varepsilon_1 = \frac{p_2}{p_1} \quad (4.1)$$

Tlak u točki 5 izračunava se preko kompresijskog omjera prema sljedećoj jednačbi:

$$\varepsilon_2 = \frac{p_5}{p_4} \quad (4.2)$$

Entalpija  $h_2$  nakon prvog stupnja kompresora izračunava se iz jednadžbe (4.3) koja predstavlja izentropsku iskoristivost prvog stupnja kompresora a dana je jednadžbom:

$$\eta_K = \frac{h_{2is} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.3)$$

gdje  $h_{2is}$  predstavlja entalpiju pri tlaku  $p_2$  za izentropsku promjenu stanja zraka.

Snaga prvog stupnja kompresora jednaka je razlici entalpija u točki 1 i 2 a dana je jednadžbom:

$$P_{K1} = q_m(h_2 - h_1) \quad (4.4)$$

Entalpija nakon drugog stupnja kompresora  $h_5$  izračunava se izentropskom jednadžbom efikasnosti drugog stupnja kompresora a dana je izrazom:

$$\eta_K = \frac{h_{5is} - h_4}{h_5 - h_4} \quad (4.5)$$

Snaga drugog stupnja kompresora jednaka je razlici entalpija u točki 5 i 4 a dana je jednadžbom:

$$P_{K2} = q_m(h_5 - h_4) \quad (4.6)$$

Entalpija na izlazu iz prvog stupnja turbine ( $h_8$ ) dobiva se jednadžbom izentropske iskoristivosti prvog stupnja turbine:

$$\eta_{Tur} = \frac{h_7 - h_8}{h_7 - h_{8is}} \quad (4.7)$$

gdje  $h_{8is}$  predstavlja entalpiju pri tlaku  $p_8$  za izentropsku promjenu stanja zraka.

Entalpija na izlazu iz drugog stupnja turbine ( $h_{10}$ ) dobiva se jednadžbom izentropske iskoristivosti drugog stupnja turbine:

$$\eta_{Tur} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10is}} \quad (4.8)$$

gdje  $h_{10s}$  predstavlja entalpiju pri tlaku  $p_8$  za izentropsku promjenu stanja zraka.

Snaga prvog stupnja turbine jednaka je razlici entalpija u točkama 7 i 8 a dana je jednadžbom:

$$P_{Tur1} = q_m(h_7 - h_8) \quad (4.9)$$

Snaga drugog stupnja turbine jednaka je razlici entalpija u točkama 9 i 10 a dana je jednadžbom:

$$P_{Tur2} = q_m(h_9 - h_{10}) \quad (4.10)$$

Neto snaga Braytonovog plinsko-turbinskog ciklusa jednaka je razlici snaga oba stupnja turbina i oba stupnja kompresora a dana je jednadžbom:

$$P_{neto,B} = (P_{Tur1} + P_{Tur2}) - (P_{K1} + P_{K2}) \quad (4.11)$$

Toplinski tok doveden u komori izgaranja jednaka je razlici entalpija u točkama 7 i 6, a dana je jednadžbom:

$$\dot{Q}_{KI} = q_m(h_7 - h_6) \quad (4.12)$$

Toplinski tok doveden u dogrijavanju (naknadnom izgaranju) jednaka je razlici entalpija u točkama 8 i 9, a dana je izrazom:

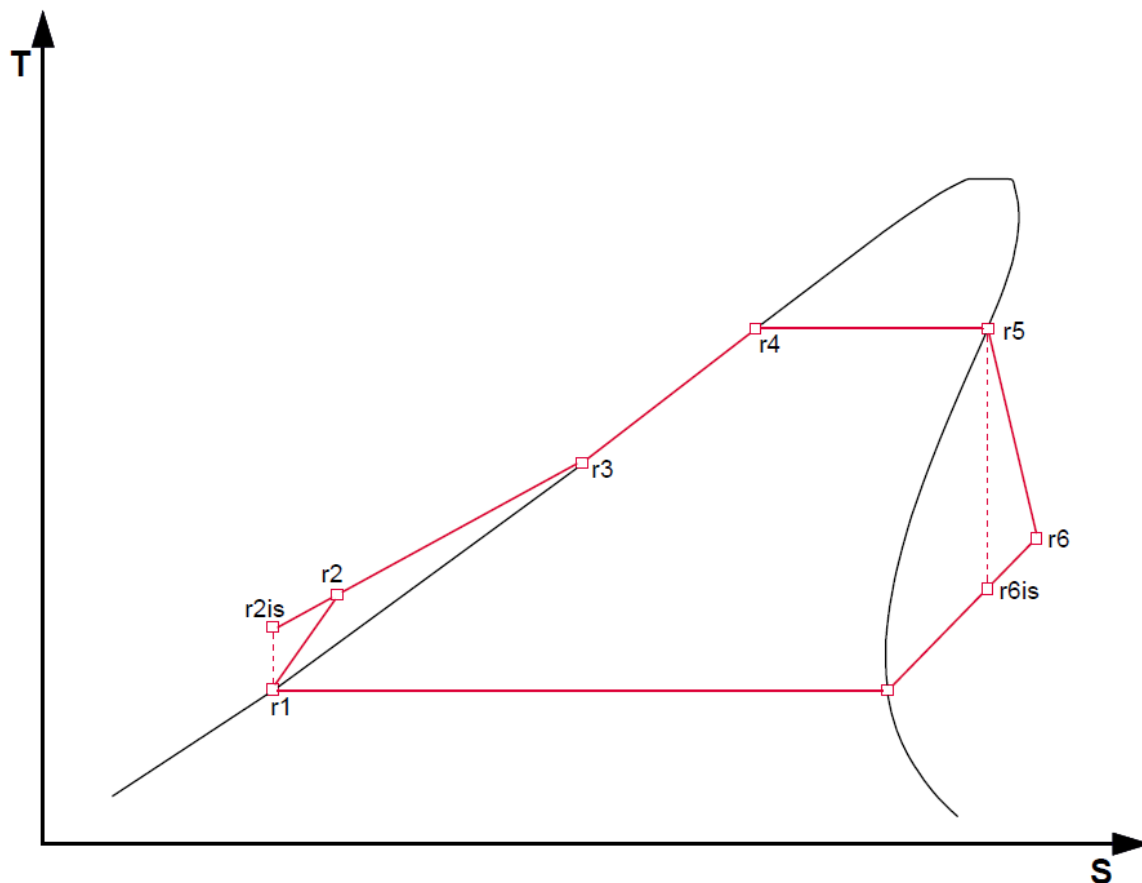
$$\dot{Q}_D = q_m(h_9 - h_8) \quad (4.13)$$

Termodinamička efikasnost Braytonovog plinsko-turbinskog ciklusa jednaka je omjeru neto snage ciklusa i utrošenog toplinskog toka a računa se jednadžbom:

$$\eta_B = \frac{P_{neto,B}}{\dot{Q}_{KI} + \dot{Q}_D} \quad (4.14)$$

## 4.2. Matematički opis ORC

U ovome poglavlju bit će opisane polazne jednačbe koje su korištene za izradu matematičkog modela parno-turbinskog ORC ciklusa. Slika 11. predstavlja opis ciklusa u T-s dijagramu.



Slika 11. T-s dijagram ORC-a

Entalpija  $h_{r6}$  nakon napojne pumpe izračunava se iz jednačbe (4.15) koja predstavlja izentropsku efikasnost turbine a dana je jednačbom:

$$\eta_{Tur,ORC} = \frac{h_{r5} - h_{r6}}{h_{r5} - h_{r6is}} \quad (4.15)$$

gdje  $h_{r6is}$  predstavlja entalpiju pri tlaku  $p_6$  za izentropsku promjenu stanja zraka.

Toplinski tok dovedena u isparivaču definirana je kao razlika entalpija u točkama 4 i 5, dana je jednadžbom:

$$\dot{Q}_{Isp} = q_{mr}(h_{r5} - h_{r4}) \quad (4.16)$$

Snaga generirana na parnoj turbini jednaka je razlici entalpija u točkama 5 i 6, a dana je jednadžbom:

$$P_{Tur,ORC} = q_{mr}(h_{r5} - h_{r6}) \quad (4.17)$$

Toplinski tok odveden kondenzatorom jednak je razlici entalpija u točkama 1 i 6, a dan je izrazom:

$$\dot{Q}_{Kond} = q_{mr}(h_{r6} - h_{r1}) \quad (4.18)$$

Entalpija na izlaznu iz napojne pumpe ( $h_{r2}$ ) dobiva se iz jednadžbe napojne pumpe koja je definirana jednadžbom:

$$\eta_{P,ORC} = \frac{h_{r2is} - h_{r1}}{h_{r2} - h_{r1}} \quad (4.19)$$

Snaga napojne pumpe jednaka je razlici entalpija u točkama 1 i 2 a dana je izrazom:

$$P_{P,ORC} = q_{mr}(h_{r2} - h_{r1}) \quad (4.20)$$

Toplinski tok doveden ekonomajzerima 1 i 2 iz plinsko-turbinskog ciklusa radnoj tvari u ORC-u jednaka je razlikama entalpija točaka 2 i 3 te 3 i 4, a izrazi su definirani kao:

$$\dot{Q}_{E1} = q_{mr}(h_{r3} - h_{r2}) \quad (4.21)$$

$$\dot{Q}_{E2} = q_{mr}(h_{r4} - h_{r3}) \quad (4.22)$$

Neto snaga ORC ciklusa jednaka je razlici snage generirane turbinom i utrošene napojnom pumpom, a dana je jednažbom:

$$P_{neto,ORC} = P_{Tur,ORC} - P_{P,ORC} \quad (4.23)$$

Termodinamička iskoristivost ORC ciklusa definirana je kao omjer neto snage ciklusa i topline dovedene ekonomajzerima i isparivaču, a dana je jednažbom:

$$\eta_{ORC} = \frac{P_{neto,ORC}}{\dot{Q}_{Isp} + \dot{Q}_{E1} + \dot{Q}_{E2}} \quad (4.24)$$

Neto snaga kombiniranog procesa jednaka je zbroju neto snaga Braytonovog plinsko-turbinskog i ORC parno-turbinskog ciklusa:

$$P_{neto,K} = P_{neto,ORC} + P_{neto,B} \quad (4.25)$$

Termodinamička iskoristivost kombiniranog procesa jednaka je omjeru neto snage kombiniranog procesa i dovedenog toplinskog toka (zbroj toplinskih tokova dovedenih u komori izgaranja i dogrijaču), a računa se jednažbom:

$$\eta_{Kombi} = \frac{P_{neto,K}}{\dot{Q}_{KI} + \dot{Q}_D} \quad (4.26)$$

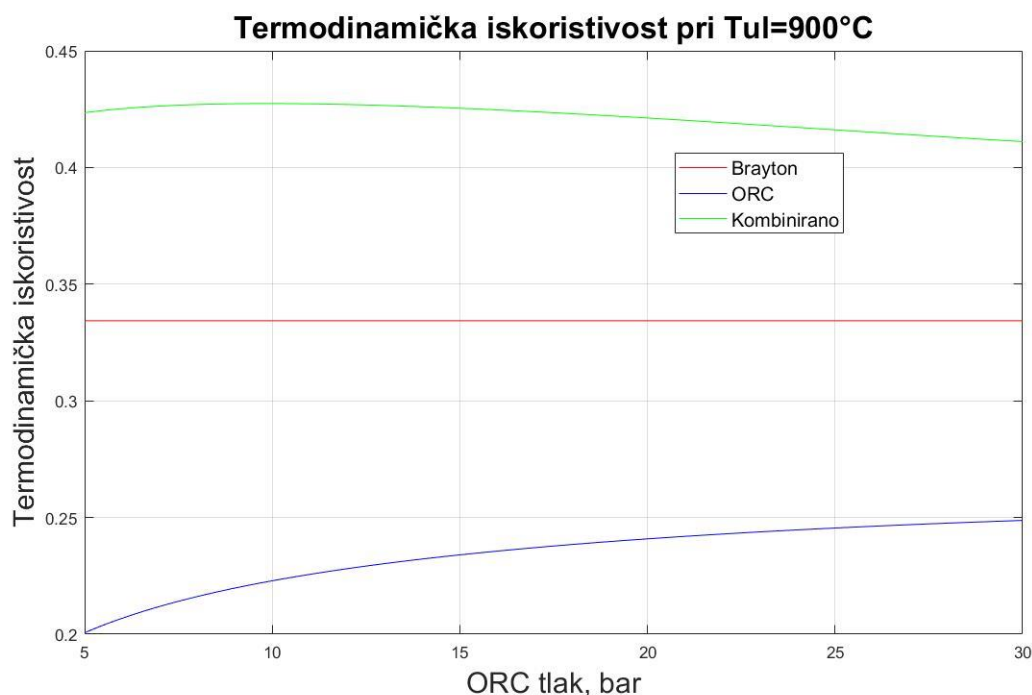
## 5. ANALIZA REZULTATA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati simulacije rada kombiniranog postrojenja. Kao što je prethodno navedeno analiza je provedena za zrak kao radni medij u Braytonovom plinsko-turbinskom ciklusu dok u ORC-u analiza je provedena s tri radna medija: tolue, aceton i cikloheksan. Analiza pokazuje kako na termodinamičku iskoristivost kombiniranog postrojenja, te pojedinačno Braytonovog i ORC utječu:

- temperatura na ulazu u plinsku turbinu u Braytonovom ciklusu  $T_{ul}$ ,
- radni tlak u ORC-u  $p_{ORC}$ ,
- temperatura pinch točke u isparivaču  $\Delta T_{pp}$ .

### 5.1. Toluen kao radni medij u ORC-u

Analiza rezultata s tolueom kao radnom tvari prikazani su i opisani u ovom poglavlju. Na slici 12. prikazana je ovisnost termodinamičke iskoristivosti Braytonovog, ORC i kombiniranog ciklusa o  $p_{ORC}$  pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu 900 °C. Simulacija je provedena za tlakove u rasponu od 5 do 30 bar u ORC-u i 15 bar u Braytonovom ciklusu.

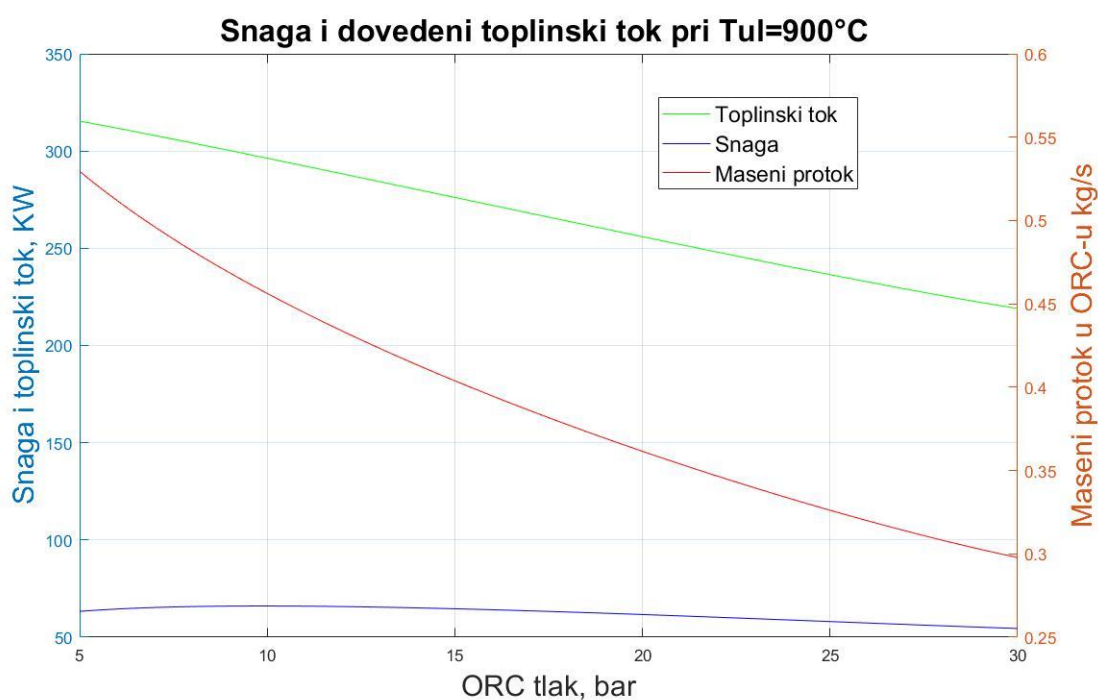


**Slika 12. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (toluen)**



Iz dijagrama na slici 12. se uočava da pri tlakovima višim od otprilike 10 bar dolazi do smanjenja termodinamičke iskoristivosti kombiniranog postrojenja  $\eta_{Kombi}$ , dok termodinamička iskoristivost ORC-a  $\eta_{ORC}$  raste. Ovakvo ponašanje  $\eta_{ORC}$  pri temperaturi 900 °C, na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa, može se objasniti dijagramom na slici 13. Dijagram prikazuje dovedeni toplinski tok ORC-u, generiranu snagu na turbini ORC-a te maseni protok u ovisnosti o  $p_{ORC}$  pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu od 900 °C. Vidljivo je da dovedeni toplinski tok u ORC  $\dot{Q}_{Dov,ORC}$  i dobivena snaga  $P_{neto,ORC}$  padaju povećanjem  $p_{ORC}$ . Međutim gradijent pada dovedenog toplinskog toka veći je od gradijenta pada dobivene snage, stoga je razumljivo da  $\eta_{ORC}$  raste ako znamo da se  $\eta_{ORC}$  računa se prema jednadžbi:

$$\eta_{ORC} = \frac{P_{neto,ORC}}{\dot{Q}_{Dov,ORC}} \quad (5.1)$$



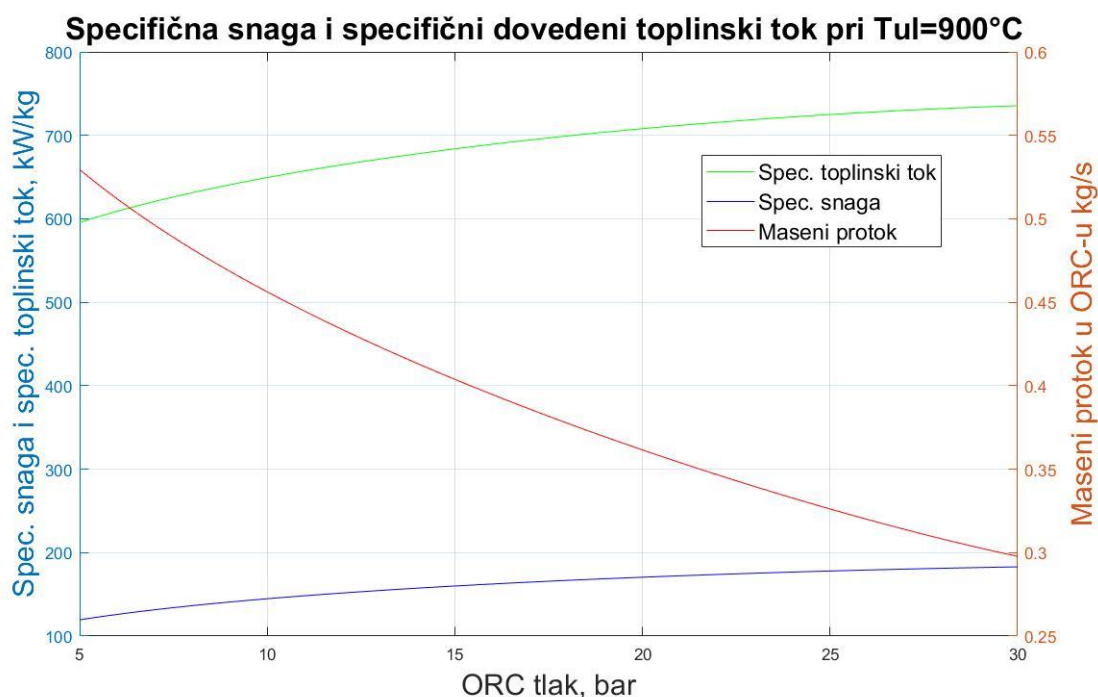
Slika 13. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen)

Pad  $\eta_{Kombi}$  pri tlakovima nižim od 10 bar može se objasniti ako pogledamo dijagram na slici 13. i jednadžbu kojom se računa  $\eta_{Kombi}$  :

$$\eta_{Kombi} = \frac{P_{neto,ORC} + P_{neto,B}}{\dot{Q}_{Dov,B}} \quad (5.2)$$

Snaga Braytonovog ciklusa ( $P_{neto,B}$ ), dovedeni toplinski tok u komoru izgaranja i dogrijaču  $\dot{Q}_{Dov,B}$  ne ovise o  $p_{ORC}$  dok  $P_{neto,ORC}$  ovisi. Sasvim je jasno da što je veća  $P_{neto,ORC}$  da je veća i  $\eta_{Kombi}$ . Iz dijagrama na slici 13. vidljivo je da  $P_{neto,ORC}$  raste do vrijednosti  $p_{ORC}$  od 10 bar nakon čega pada pri višim tlakovima.

Razlog zašto snaga dobivena na turbini ORC-a pada s porastom  $p_{ORC}$  može se objasniti dijagramom na slici 14. Na dijagramu su prikazane vrijednosti specifične snage dobivene na turbini ORC-a, dovedeni specifični toplinski tok ciklusu te maseni protok u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Uočava se da porastom  $p_{ORC}$ , specifična snaga i specifični toplinski tok rastu, dok maseni protok pada. Kako je snaga jednaka umnošku specifične snage i masenog protoka, jasno je da zbog velikog gradijenta pada masenog protoka dolazi i do pada  $P_{neto,ORC}$  (slika 13.).



**Slika 14. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen)**

Razlog pada masenog protoka u području  $p_{ORC}$  do 15 bar, identičan je kao u cijelome području ranog tlaka ORC-a pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa od 900 °C gdje pri porastu tlaka, gradijent pada toplinskog toka dovedenog isparivaču veći, nego što je gradijent pada latentne topline ( $h_{r5} - h_{r4}$ ). Zbog toga dolazi do pada masenog protoka povećanjem  $p_{ORC}$ . Na dijagramu su prikazani dovedeni toplinski tok od strane Braytonovog ciklusa u isparivaču, specifična latentna toplota toluena ( $h_{r5} - h_{r4}$ ) i maseni protok u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Toplina dovedena u isparivaču od iz Braytonovog ciklusa dana je jednadžbom:

$$\dot{Q}_{isp} = q_m(h_{11} - h_{12}) \quad (5.3)$$

Entalpija  $h_{11}$  ne ovisi o  $p_{ORC}$ , dok entalpija  $h_{12}$  ovisi o iznosu zadane pinch temperature i  $p_{ORC}$ . Toplina koju radni medij primi u ORC-u u isparivaču dana je jednadžbom:

$$\dot{Q}_{isp} = q_{mr}(h_{r5} - h_{r4}) \quad (5.4)$$

Temperatura  $T_{12}$ , o kojoj ovisi entalpija  $h_{12}$ , ovisna je o temperaturi  $T_{r4}$ . Veza te dvije veličine dana je jednadžbom:

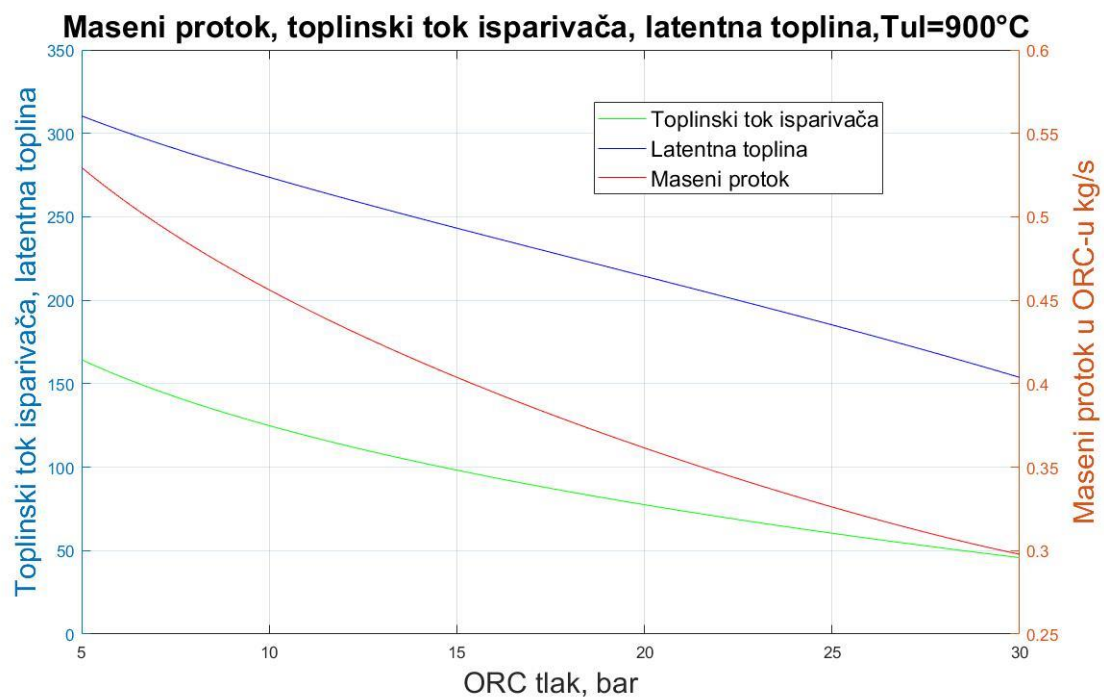
$$T_{12} = T_{r4} + \Delta T_{pp} \quad (5.5)$$

gdje je  $\Delta T_{pp}$  pinch temperatura isparivača.

Za viši  $p_{ORC}$ , viša je i temperatura zasićenja  $T_{r4}$  a prema tome viša je temperatura  $T_{12}$  iz čega slijedi i viša entalpija  $h_{12}$ . Prema jednadžbi (5.3) slijedi da se povećanjem entalpije  $h_{12}$  smanjuje izmijenjena toplota u isparivaču. Također, porastom  $p_{ORC}$ , smanjuje se latentna toplota isparavanja radnog medija ( $h_{r5} - h_{r4}$ ). Maseni protok ORC-a računa se jednadžbom:

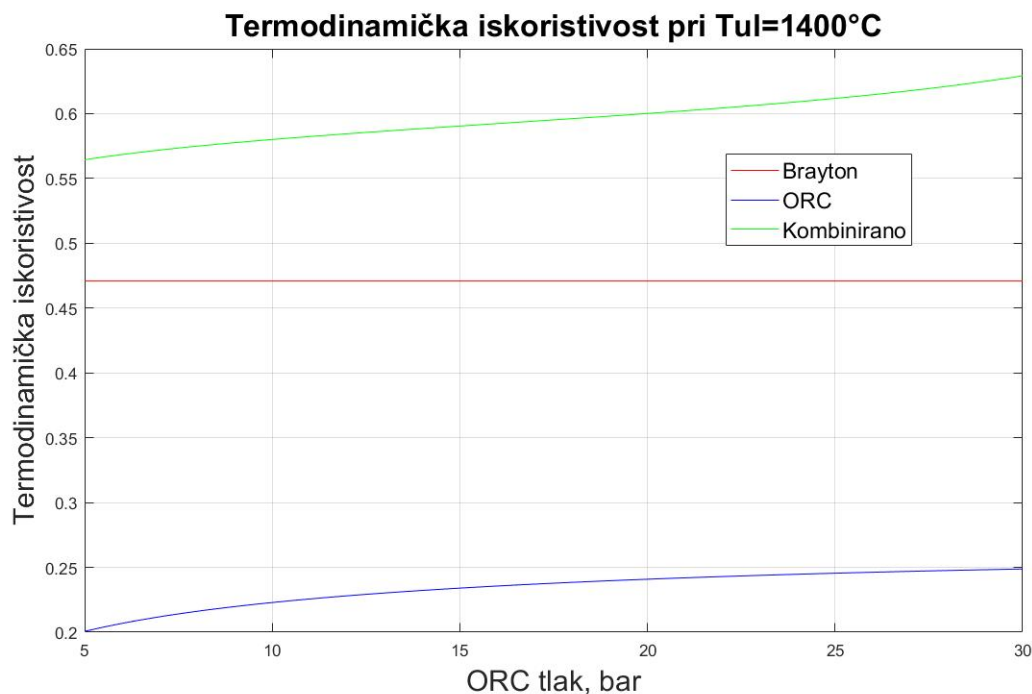
$$q_{mr} = \frac{\dot{Q}_{isp}}{(h_{r5} - h_{r4})} \quad (5.6)$$

Iz dijagrama na slici 15. može se zaključiti da pri porastu tlaka ORC-a, gradijent pada toplinskog toka dovedenog isparivaču veći, nego što je gradijent pada latentne topline ( $h_{r5} - h_{r4}$ ). Iz toga proizlazi pad masenog protoka povećanjem  $p_{ORC}$ .



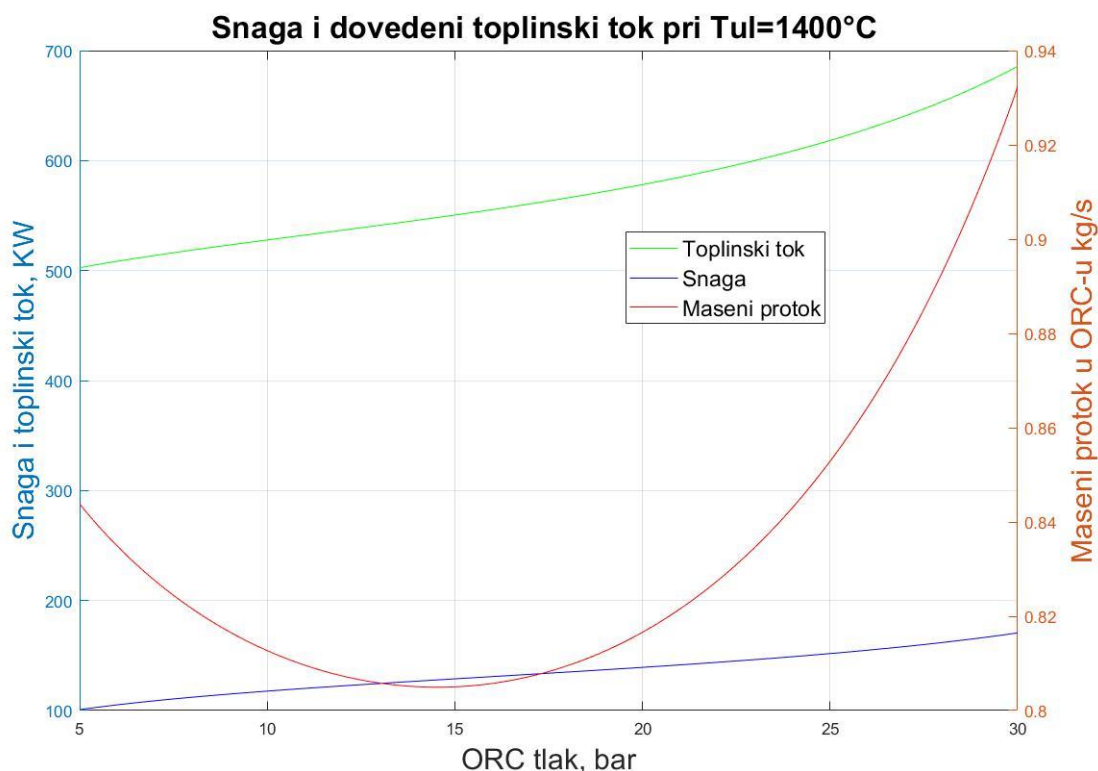
**Slika 15. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (toluen)**

U slučaju kada je temperatura na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa 1400 °C,  $\eta_{ORC}$  i  $\eta_{Kombi}$  rastu s porastom  $p_{ORC}$  kako je i vidljivo iz dijagrama na slici 16.



**Slika 16. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (toluen)**

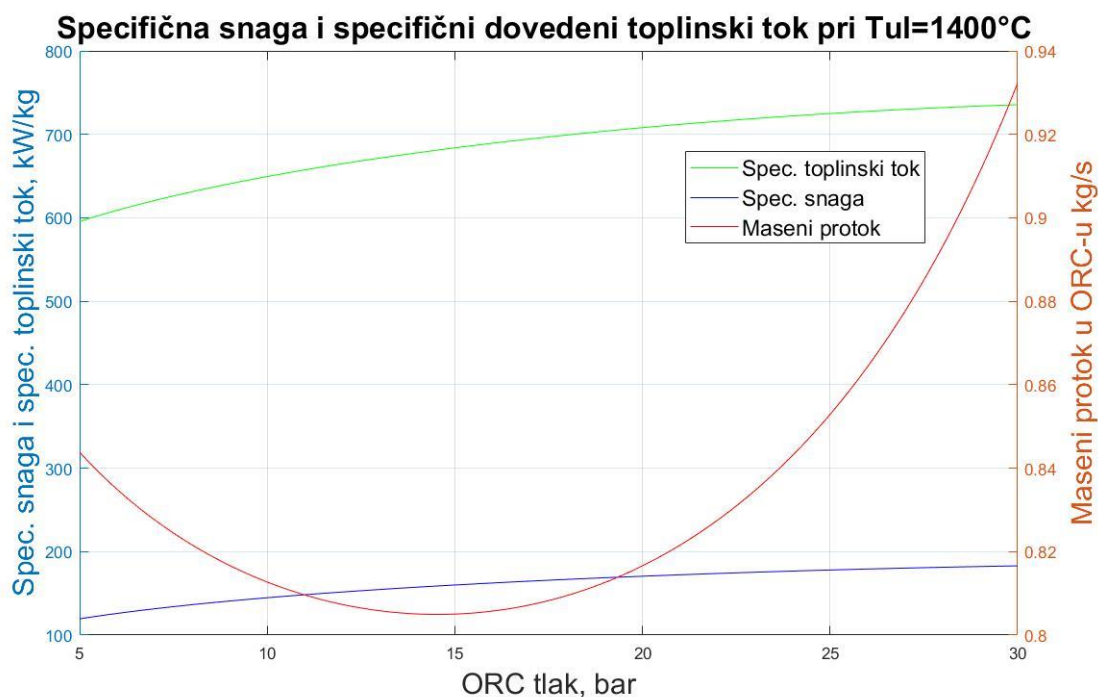
Termodinamička iskoristivost kombiniranog procesa  $\eta_{Kombi}$  prelazi 60 % za temperaturu na ulazu u plinsku turbinu od 1400 °C, dok za temperaturu 900 °C  $\eta_{Kombi}$  ne prelazi 50 %. Dijagram na slici 17. prikazuje ovisnost dovedenog toplinskog toka, dobivene snage na parnoj turbini i maseni protok ORC-a u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Iz dijagrama je vidljivo da dovedeni toplinski tok ORC-u i snaga generirana na turbini rastu porastom tlaka. Maseni protok ORC-a pada do tlaka 15 bar, a nakon toga raste daljnjim porastom tlaka.



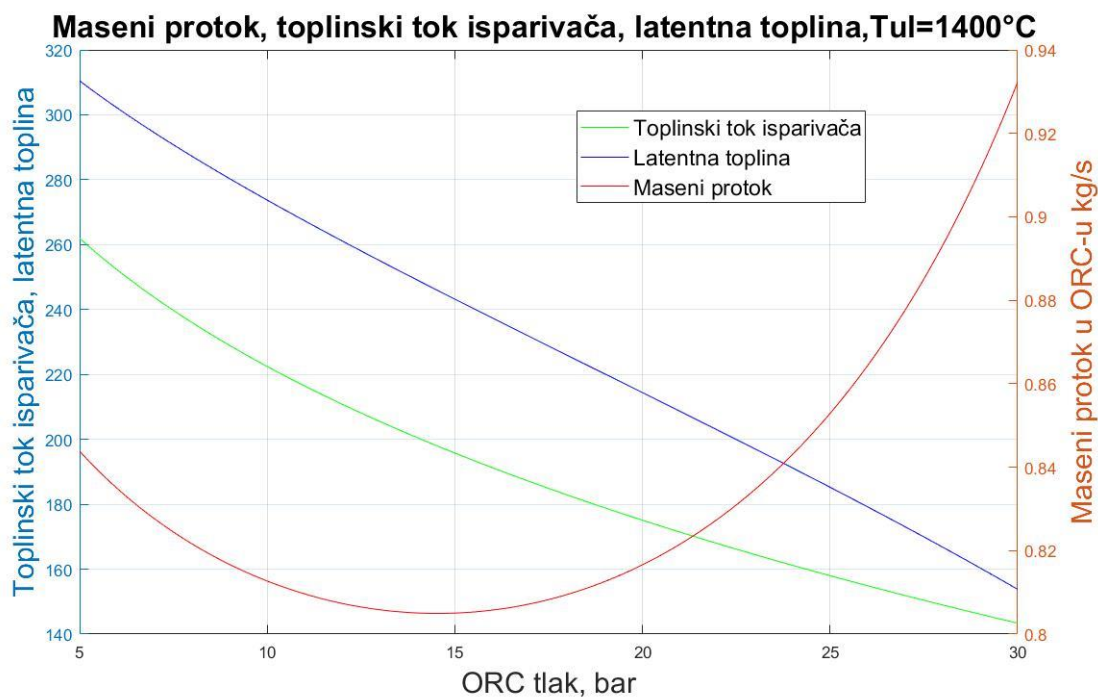
Slika 17. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen)

U usporedbi sa slučajem gdje je temperatura na ulazu u plinsku turbinu  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ovdje snaga ne pada porastom tlaka ORC-a. Iako u području  $p_{ORC}$  do 15 bara, maseni protok pada, snaga raste. To se objašnjava dijagramom 18. gdje su prikazane su ovisnosti specifične snage, specifičnog toplinskog toka i masenog protoka ORC-a u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Utjecaj pada masenog protoka znatno je manji od utjecaja specifične snage, stoga raste i ukupna snaga u tome području.

Razlog pada masenog protoka u području  $p_{ORC}$  do 15 bar, identičan je kao u cijelome području ranog tlaka ORC-a pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa od  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  gdje pri porastu tlaka, gradijent pada toplinskog toka dovedenog isparivaču veći, nego što je gradijent pada latentne topline ( $h_{r5} - h_{r4}$ ). Dijagramom na slici 19. prikazano je ponašanje latentne topline, toplinskog toka dovedenog isparivaču od strane Braytonovog ciklusa i masenog protoka u ovisnosti o  $p_{ORC}$ .

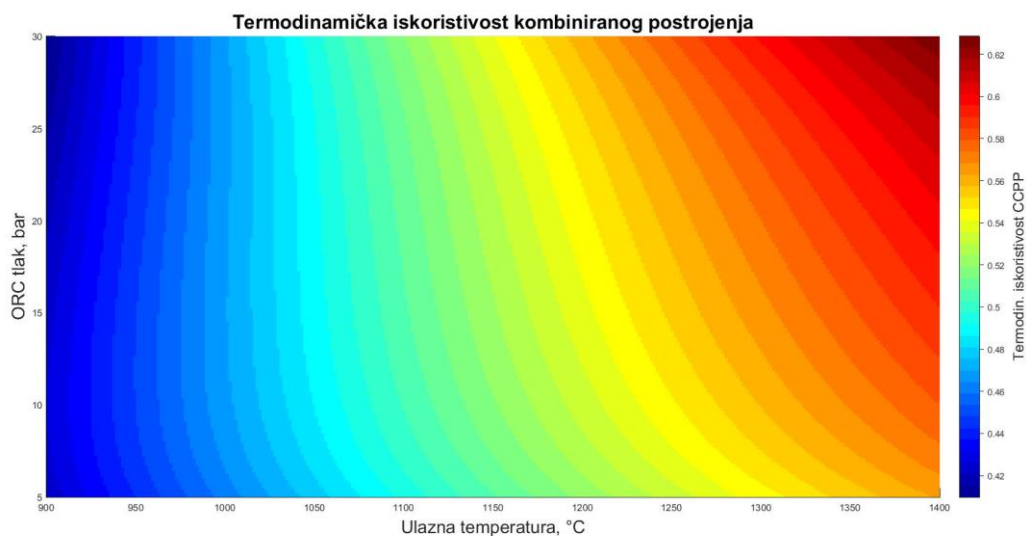


Slika 18. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (toluen)



Slika 19. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (toluen)

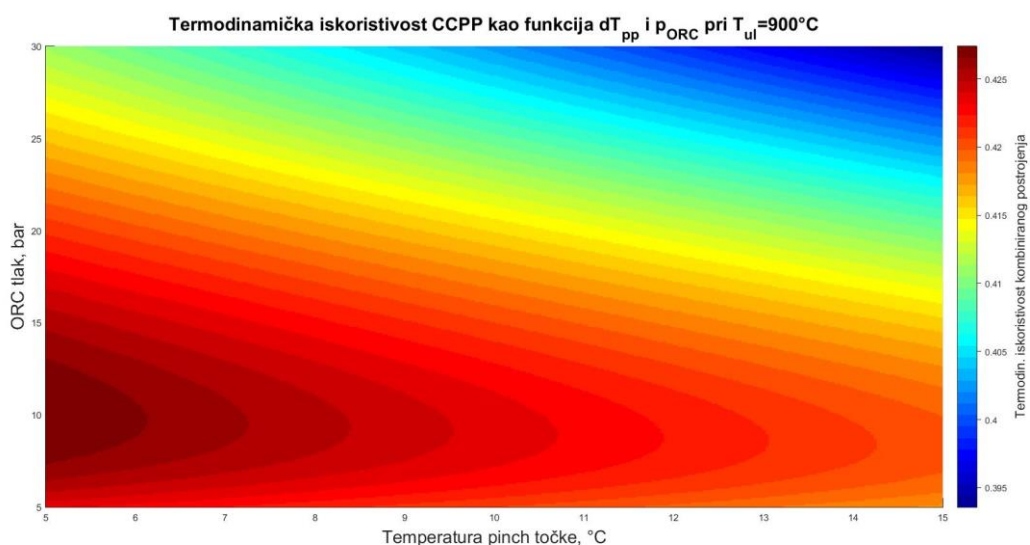
Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja  $\eta_{Kombi}$  u ovisnosti o temperaturi na ulazu u plinsku turbinu i  $p_{ORC}$  prikazana je dijagramom na slici 20. Vidljivo je kako postrojenje postiže najveću iskoristivost pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu 1400 °C i  $p_{ORC}$  30 bar. Ispod temperature na ulazu u turbinu od 1050 °C postoji maksimum  $\eta_{Kombi}$  pri nekom  $p_{ORC}$  koji je manji od 30 bar, dok za temperaturu iznad 1050 °C maksimalan  $\eta_{Kombi}$  se postiže pri tlaku od 30 bar.



**Slika 20. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (toluen)**

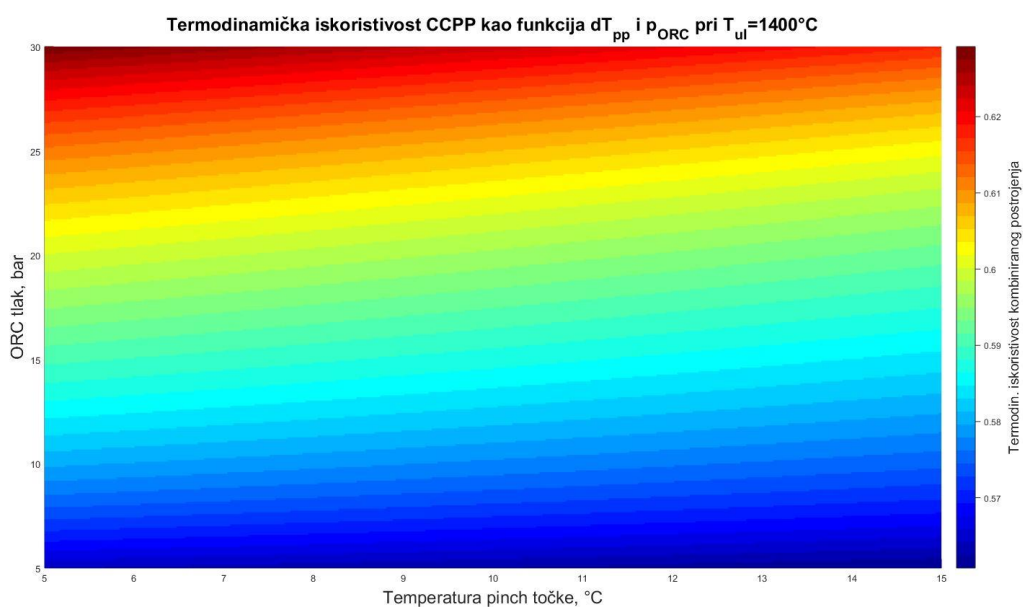
Dijagramima na slikama 21. i 22. prikazane su ovisnosti termodinamičke iskoristivosti kombiniranog postrojenja o  $p_{ORC}$  i temperaturi pinch točke u isparivaču. Dijagram na slici 21. prikazuje ovisnost kada je temperatura na ulazu u plinsku turbinu 900 °C, te je iz njega vidljivo da je najveća  $\eta_{Kombi}$  pri  $p_{ORC}$  10 bar i temperaturi pinch točke 5 °C. Razlog zašto je najveća  $\eta_{Kombi}$  pri tlaku 10 bar objašnjena je prethodno i prikazano dijagramom na slici 12. Rast termodinamičke iskoristivosti kombiniranog postrojenja pri nižim temperaturama pinch točke dolazi zbog veće termodinamičke iskoristivosti ORC-a. Nižom temperaturom pinch točke više je topline izmijenjeno u isparivaču pa prema tome radni medij ORC-a je primio više topline, te se zbog toga dobiva i veća snaga na turbini.





**Slika 21. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (toluen)**

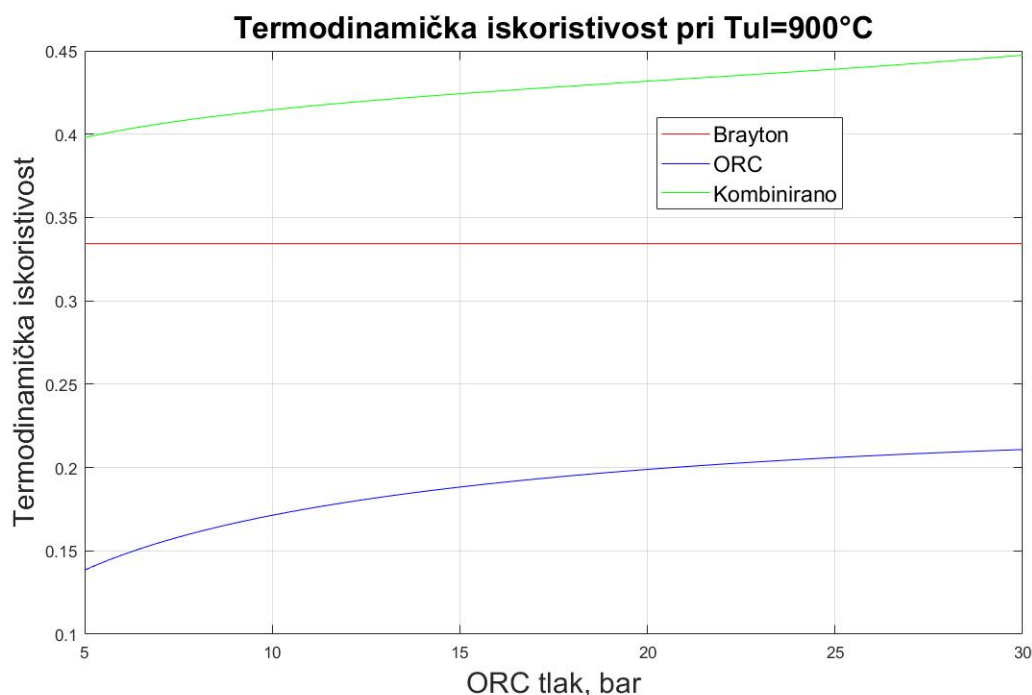
Pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu  $1400^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta_{Kombi}$  raste porastom  $p_{ORC}$  i pri nižim temperaturama pinch točke. Rast zbog povećanja tlaka prethodno je objašnjen i prikazan dijagramom na slici 16. Utjecaj temperature pinch točke identičan je kao i u slučaju temperature na ulazu u plinsku turbinu  $900^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 22. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (toluen)**

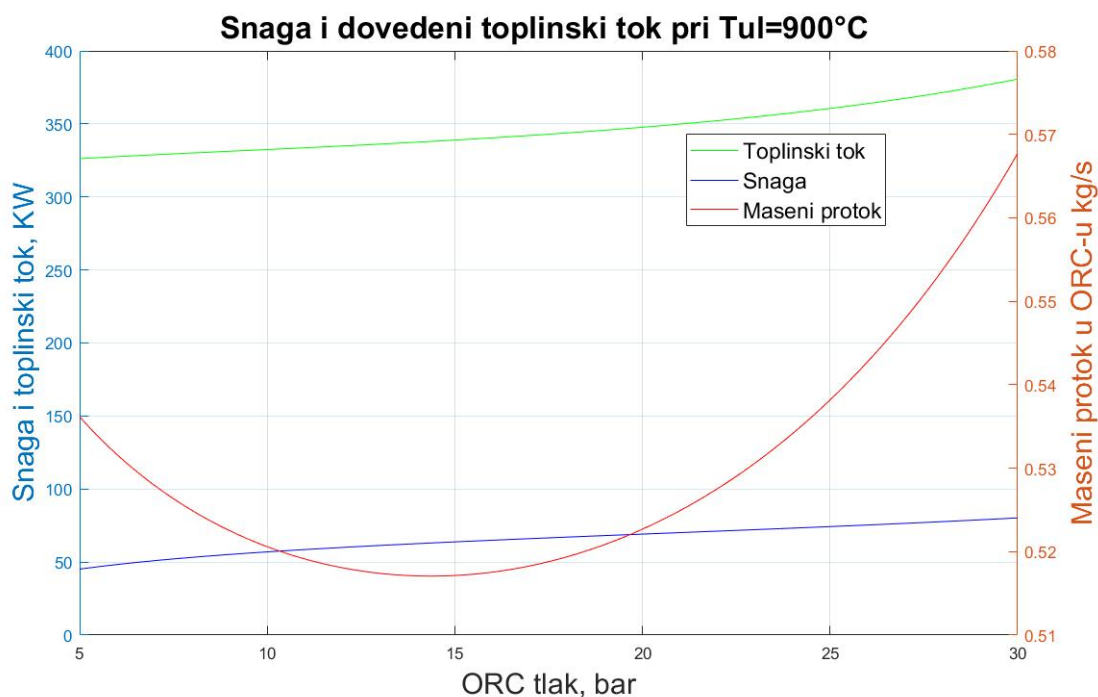
## 5.2. Aceton kao radni medij u ORC-u

Analiza rezultata s acetonom kao radnom tvari prikazana je i opisana u ovome poglavlju. Na slici 23. prikazan je dijagram ovisnosti termodinamičke iskoristivosti Braytonovog, ORC i kombiniranog ciklusa o  $p_{ORC}$  pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu 900 °C. Simulacija je provedena za tlakove u rasponu od 5 do 30 bar u ORC-u i 15 bar u Braytonovom ciklusu kao i za slučaj toluena.

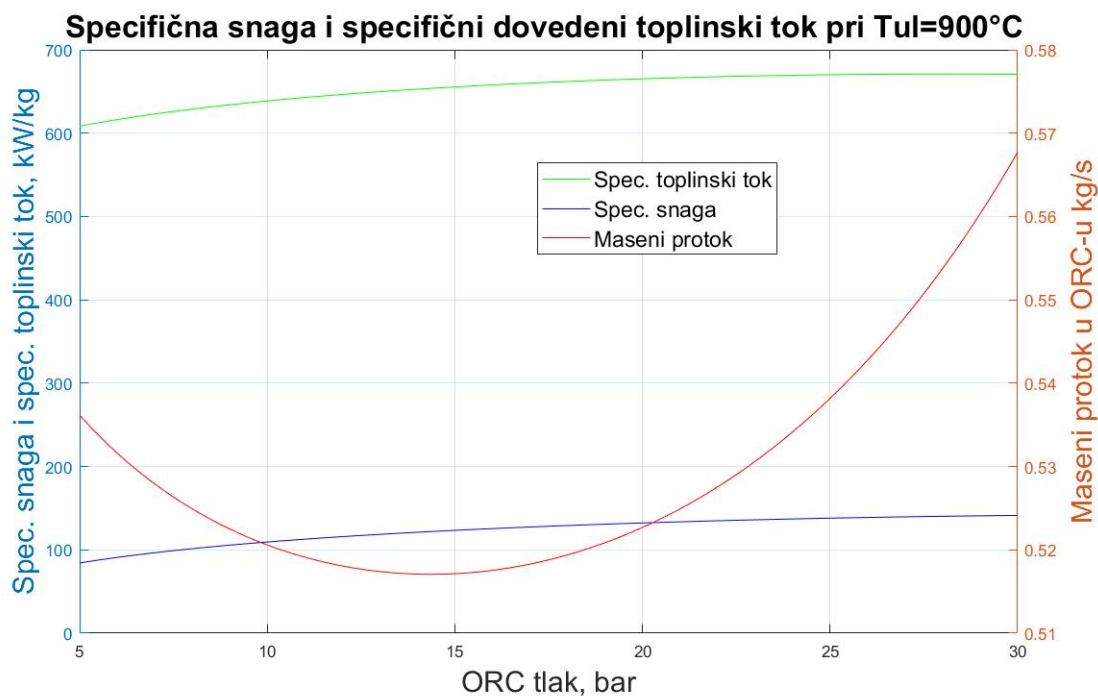


**Slika 23. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (aceton)**

Iz dijagrama je vidljivo da sve tri iskoristivosti rastu porastom  $p_{ORC}$ . Dijagram na slici 24. prikazuje ovisnost masenog protoka, dobivene snage i dovedenog toplinskog toka ORC-a u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Iz dijagrama je vidljivo da snaga i toplinski tok rastu porastom  $p_{ORC}$ . Međutim maseni protok pada pri o  $p_{ORC}$  nižem od 15 bar, nakon čega raste. Pad masenog protoka događa se iz istog razloga kao i slučaju gdje je toluen radni medij.

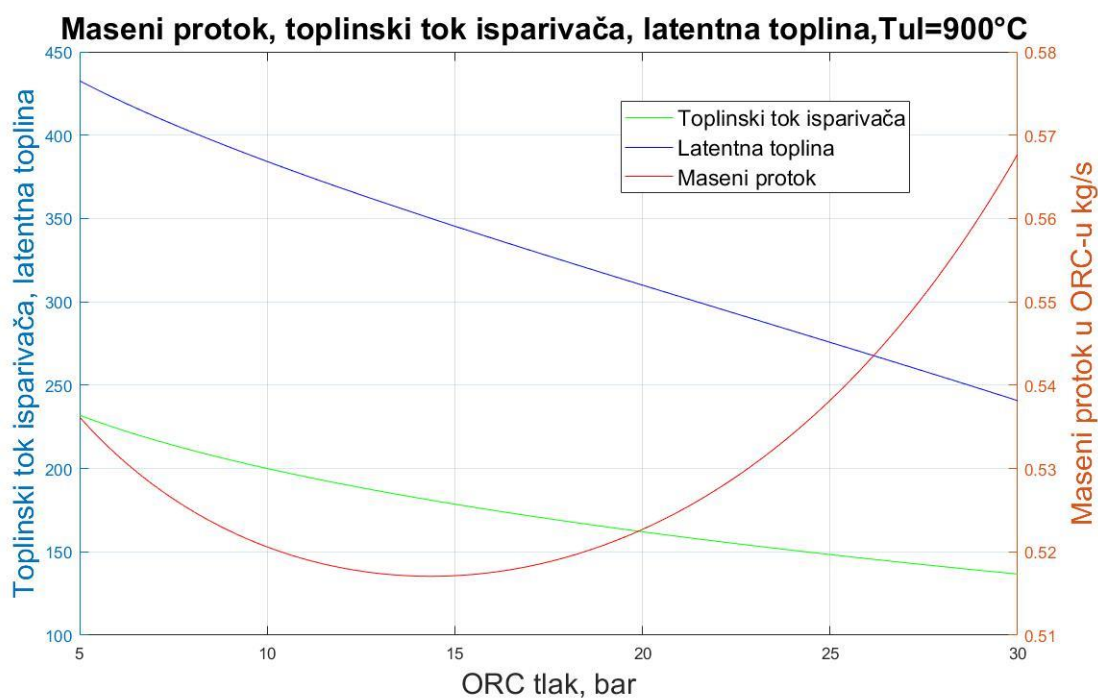


Slika 24. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone)



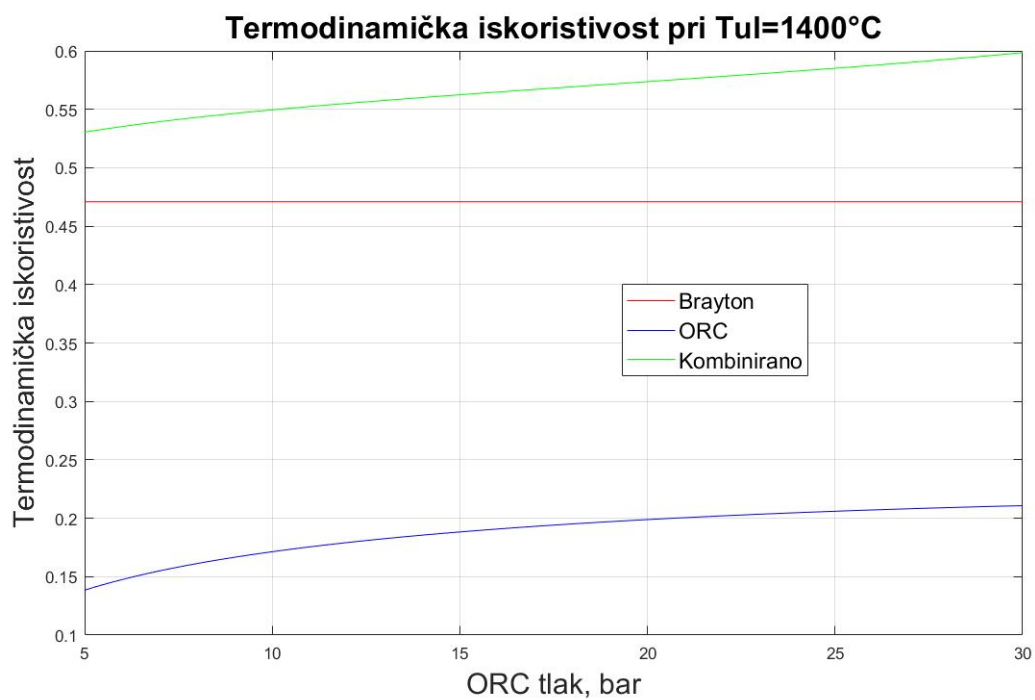
Slika 25. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone)

Na slici 25. dijagramom je prikazana ovisnost masenog protoka, specifične snage i specifičnog toplinskog toka o  $p_{ORC}$ . Gradijent pada masenog protoka manji je od gradijenta porasta specifične snage pa prema tome snaga raste s porastom  $p_{ORC}$ . Razlog pada masenog protoka u području  $p_{ORC}$  do 15 bar, identičan je kao u cijelome području radnog tlaka ORC-a za toluen kao radni medij, pri  $T_{ul}$  900 °C. Porastom tlaka, gradijent pada toplinskog toka dovedenog isparivaču je veći, nego što je gradijent pada latentne topline ( $h_{r5} - h_{r4}$ )(jednadžba 5.6). Zbog toga dolazi do pada masenog protoka povećanjem  $p_{ORC}$ . Dijagramom na slici 26. prikazana je ovisnost toplinskog toka dovedenog isparivaču, latentne topline ( $h_{r5} - h_{r4}$ ) i masenog protoka o  $p_{ORC}$ .

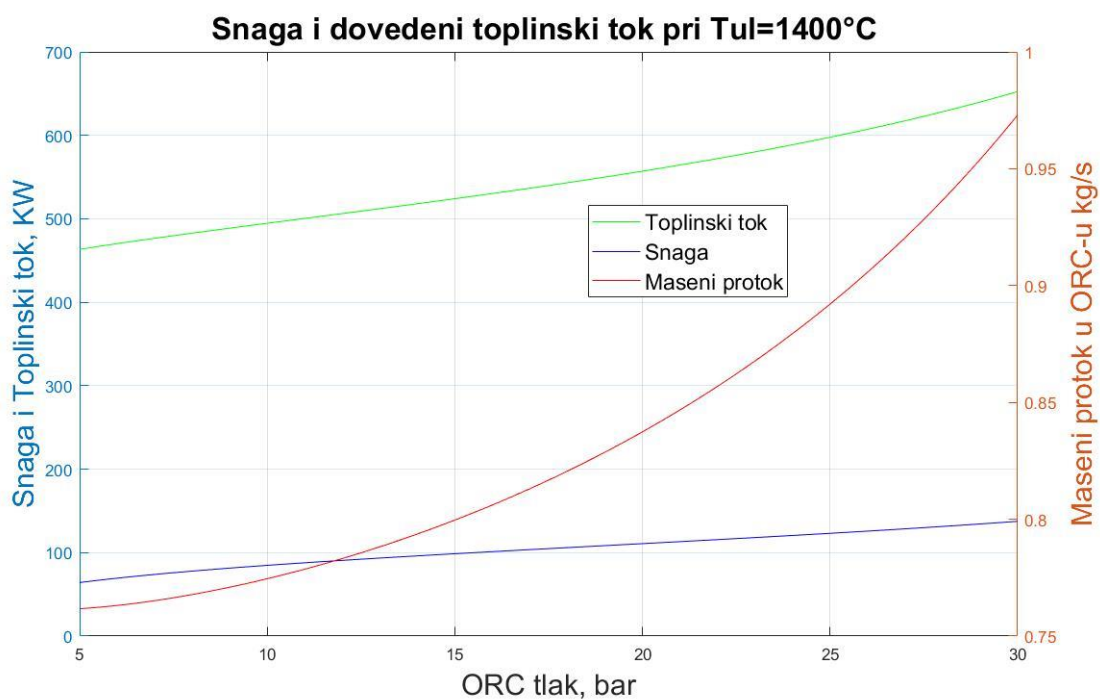


**Slika 26. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (acetona)**

Slika 27. prikazuje dijagram ovisnosti  $\eta_{Kombi}$ ,  $\eta_B$  i  $\eta_{ORC}$  o  $p_{ORC}$ . U usporedbi sa slučajem gdje je  $T_{ul}$  900 °C, termodinamička iskoristivost svih triju ciklusa postiže mnogo bolje rezultate. Iz dijagrama je vidljivo kako ona doseže čak 60 % pri tlaku  $p_{ORC}$  od 30 bar. Na slici 28. prikazan je dijagram gdje snaga, toplinski tok te maseni protok rastu porastom  $p_{ORC}$ .

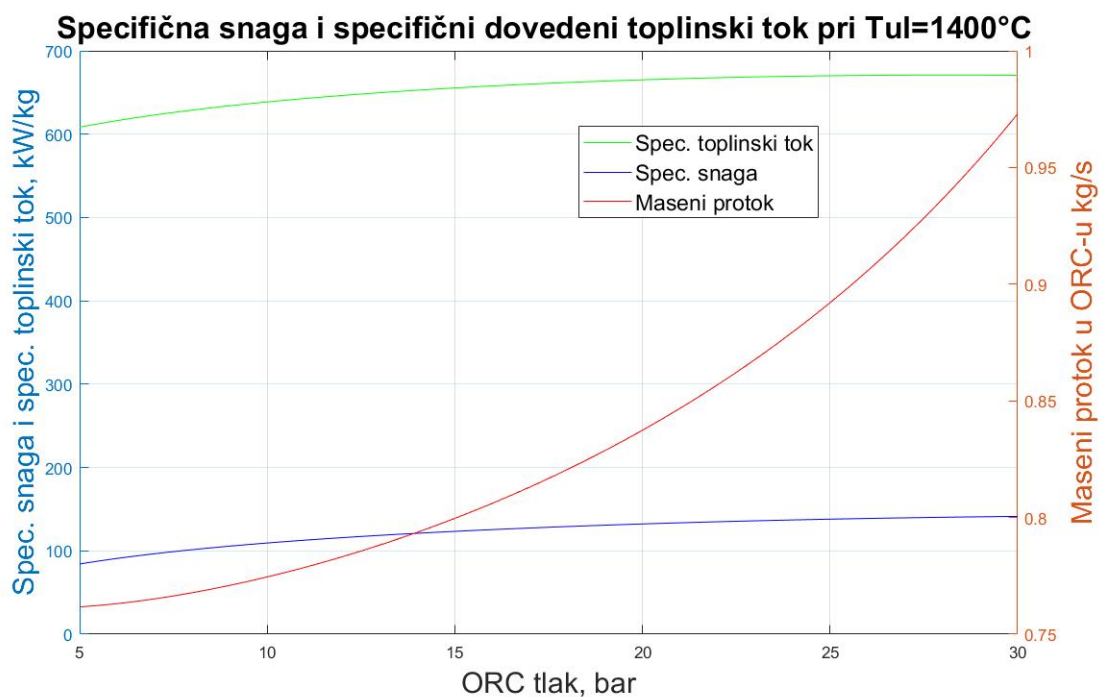


Slika 27. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (acetone)



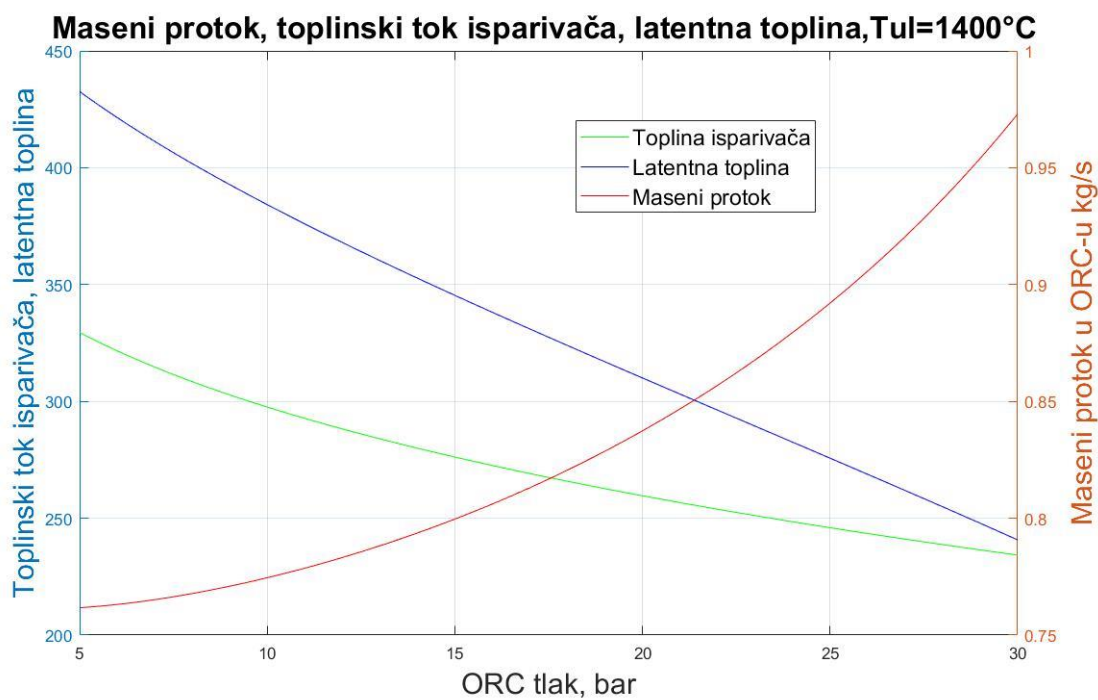
Slika 28. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone)

Dijagram na slici 29. prikazuje ovisnost specifičnog toplinskog toka, masenog protoka i snage u ORC-u o  $p_{ORC}$ . Sve tri veličine rastu porastom  $p_{ORC}$ . Dijagramom na slici 28. prikazano je ponašanje latentne topline, toplinskog toka dovedenog isparivaču od strane Braytonovog ciklusa i masenog protoka u ovisnosti o  $p_{ORC}$ . Iz dijagrama je vidljivo kako na cijelom području masni protok raste cijelim područjem povećanja tlaka  $p_{ORC}$ , što nije slučaj kada je  $T_{ul}=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

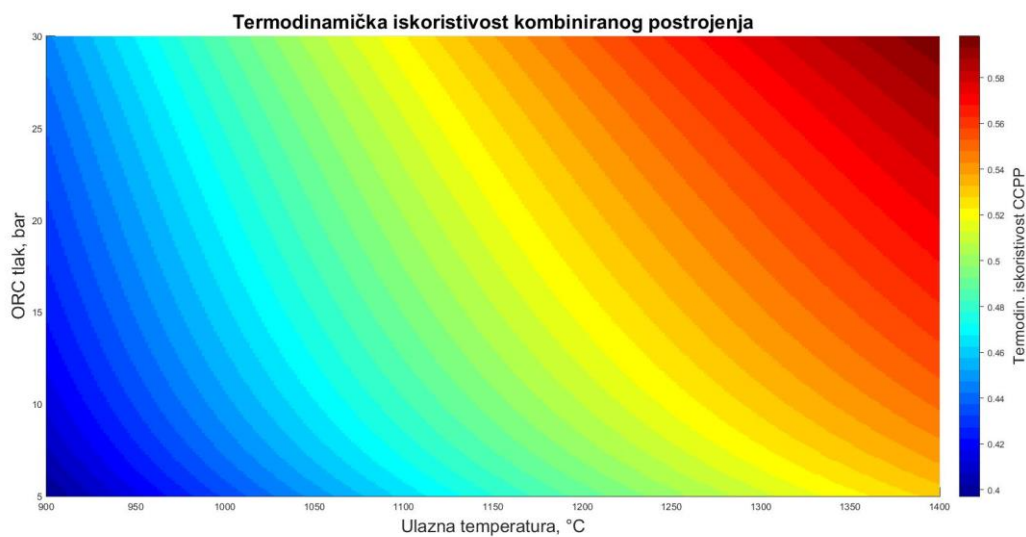


**Slika 29. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (acetone)**





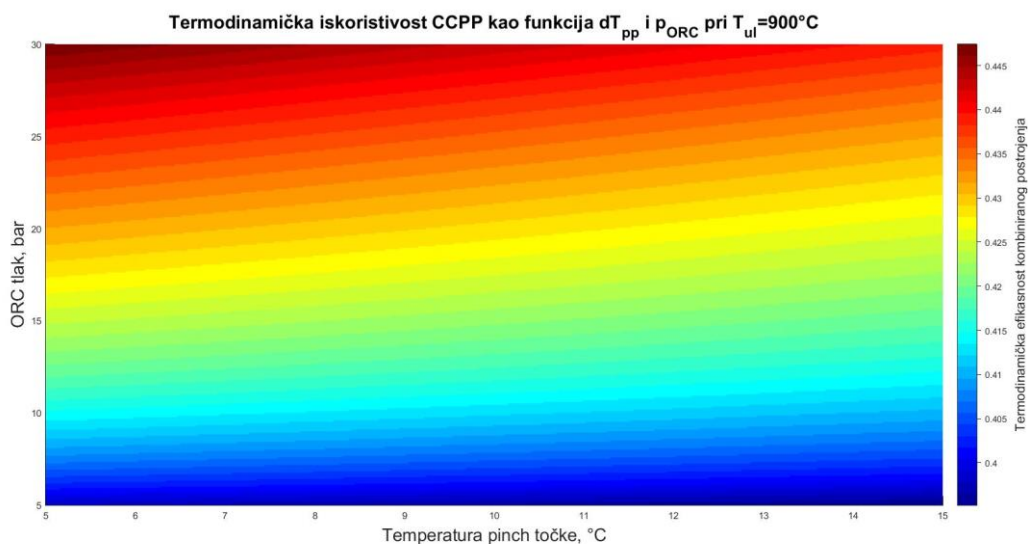
**Slika 30. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (acetone)**



**Slika 31. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (acetone)**

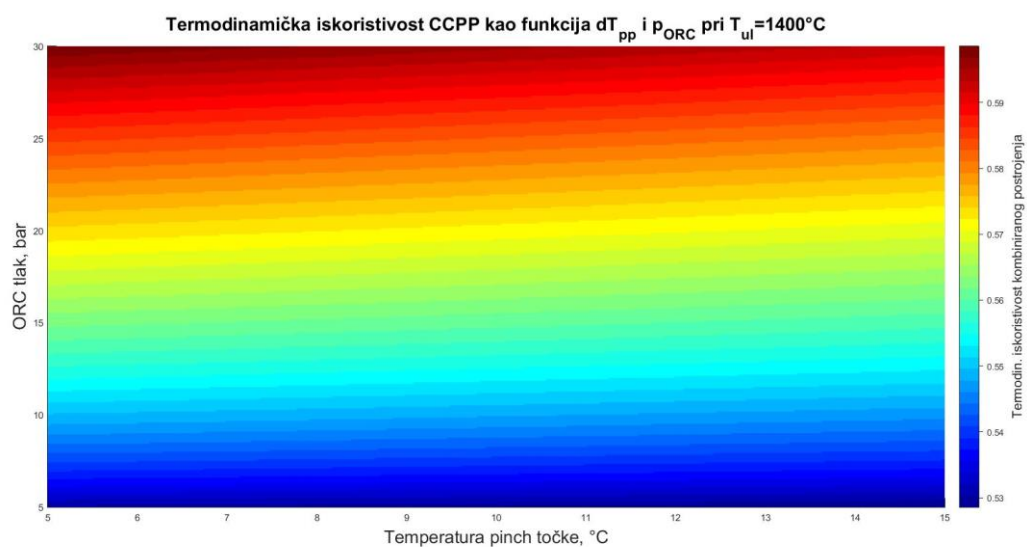


Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja  $\eta_{Kombi}$  u ovisnosti o temperaturi na ulazu u plinsku turbinu i  $p_{ORC}$  prikazana je dijagramom na slici 31. Vidljivo je kako postrojenje postiže najveću iskoristivost pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu 1400 °C i  $p_{ORC}$  30 bar.



**Slika 32. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (acetona)**

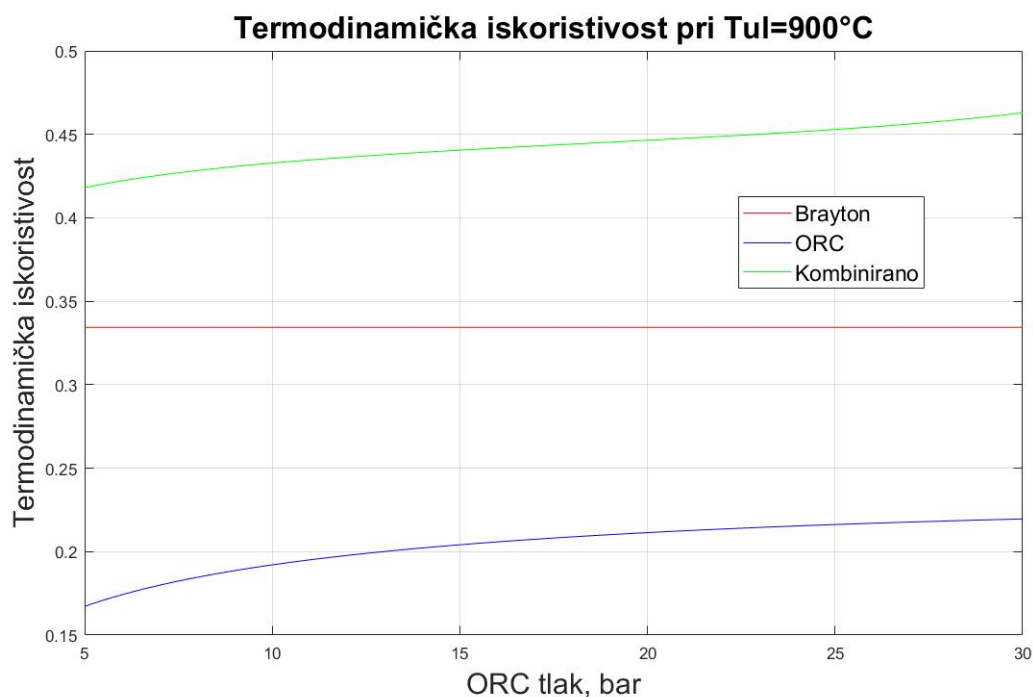
Dijagramima na slikama 32. i 33. prikazane su ovisnosti termodinamičke iskoristivosti kombiniranog postrojenja o  $p_{ORC}$  i temperaturi pinch točke u isparivaču. Prvi dijagram prikazuje ovisnost pri temperaturi  $T_{ul}=900^{\circ}\text{C}$ , a drugi  $T_{ul}=1400^{\circ}\text{C}$ . Iz oba dijagrama je vidljivo kako termodinamička iskoristivost  $\eta_{Kombi}$  je najviša pri višim tlakovima  $p_{ORC}$  i nižom temperaturom pinch točke.



**Slika 33. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (acetone)**

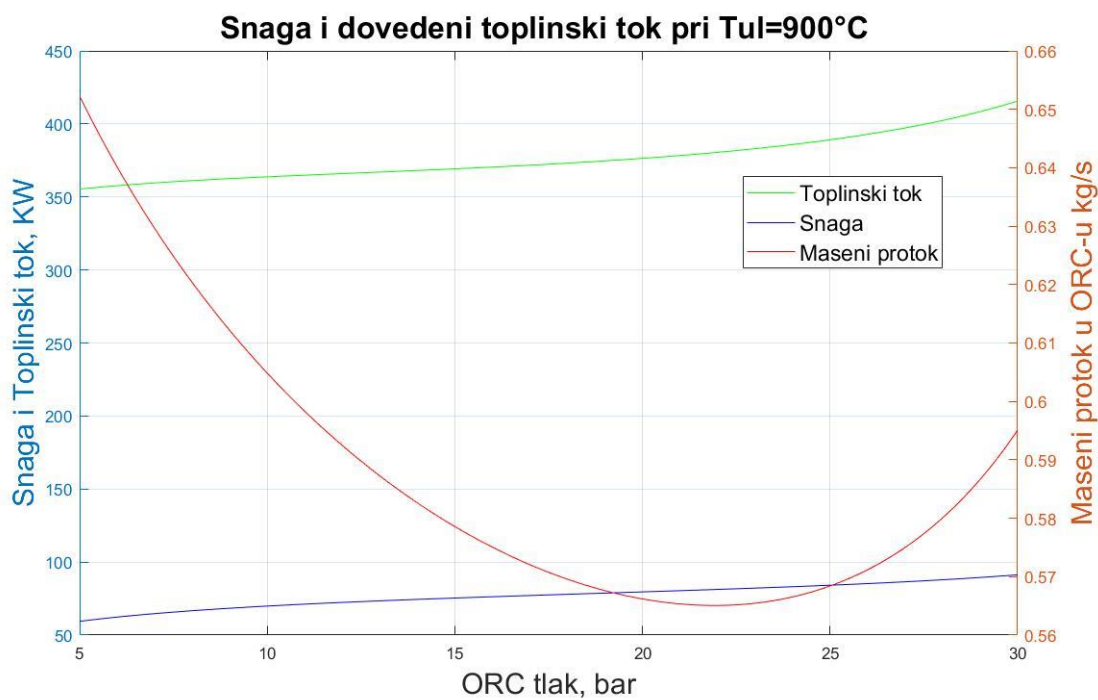
### 5.3. Cikloheksan kao radni medij u ORC-u

Analiza rezultata s cikloheksanom kao radnom tvari prikazani su i opisani u ovome poglavlju. Simulacija je provedena za tlakove u rasponu od 5 do 30 bar u ORC-u i 15 bar u Braytonovom ciklusu kao i za slučaj toluena i acetona.

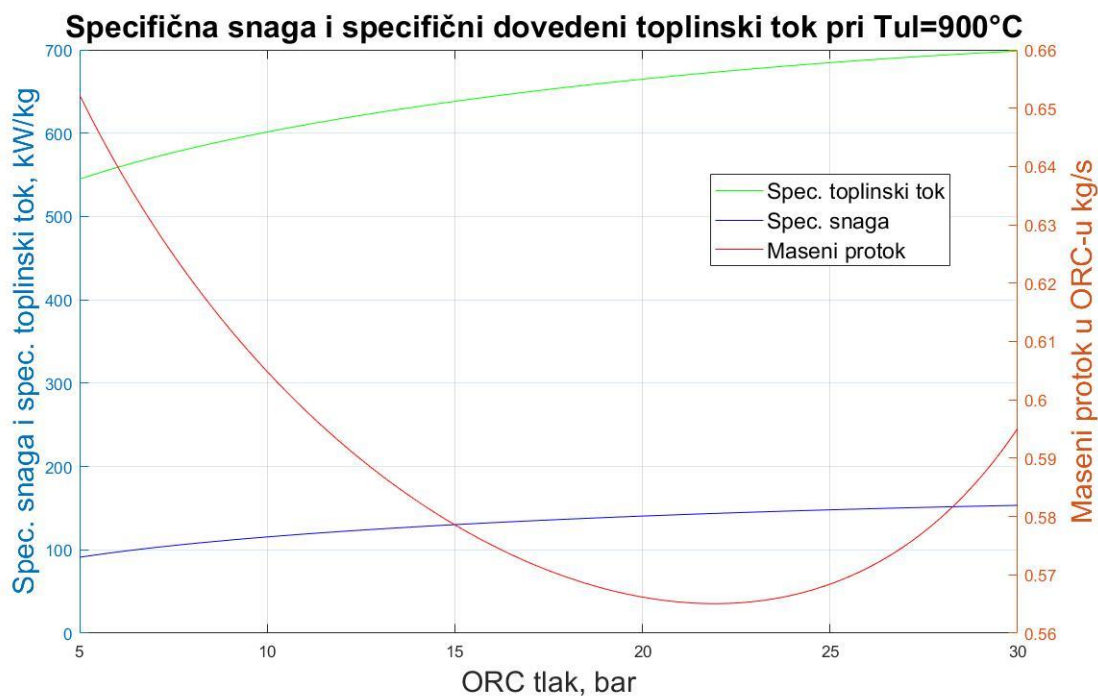


**Slika 34. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan)**

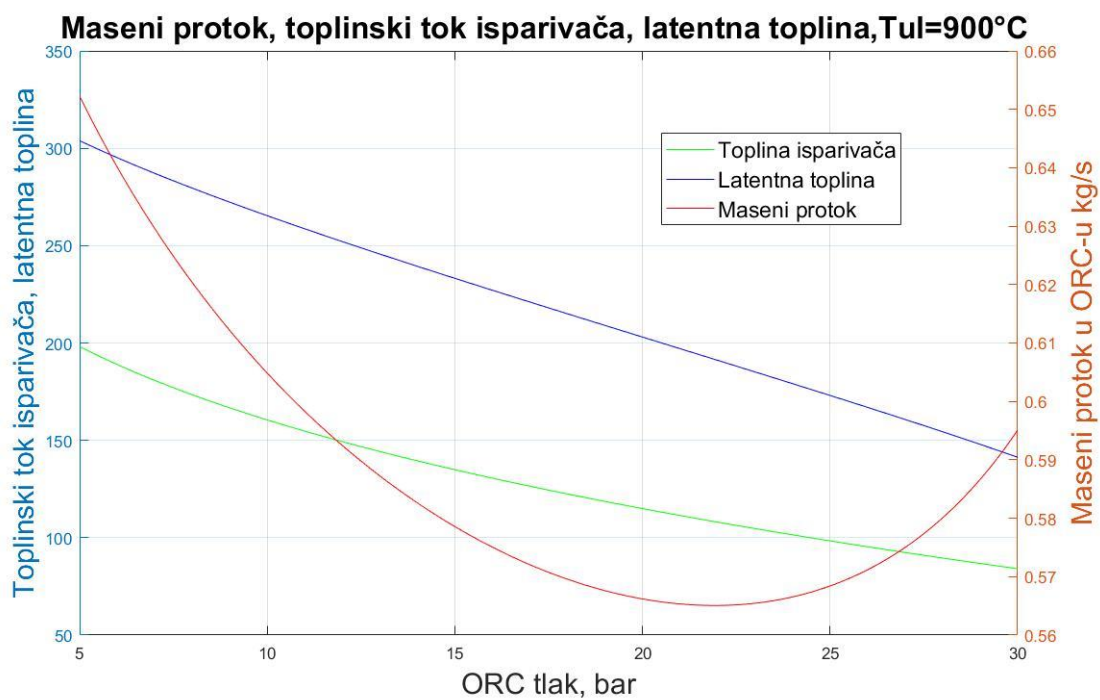
Na slici 34. prikazana je ovisnost termodinamičke iskoristivosti Braytonovog, ORC i kombiniranog ciklusa o  $p_{ORC}$  pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu  $T_{ul}=900\text{ °C}$ . Vidljivo je kako je  $\eta_{Kombi}$  viša u usporedbi sa slučajem kada su radni mediji u ORC-u toluen i aceton pri  $T_{ul}=900\text{ °C}$ . Dovedeni toplinski tok, snaga i maseni protok u ovisnosti o  $p_{ORC}$  ponašaju se vrlo slično kao i kada je radni medij toluen, a to se može vidjeti na slici 35. Razlika je u tome što maseni protok doseže najmanju vrijednost pri tlaku od oko 23 bar. Ponašanje specifičnog toplinskog toka, specifične snage, latentne topline i toplinskog toka isparivača u ovisnosti o  $p_{ORC}$ , za  $T_{ul}=900\text{ °C}$ , prikazano je dijagramima na slikama 36 i 37.



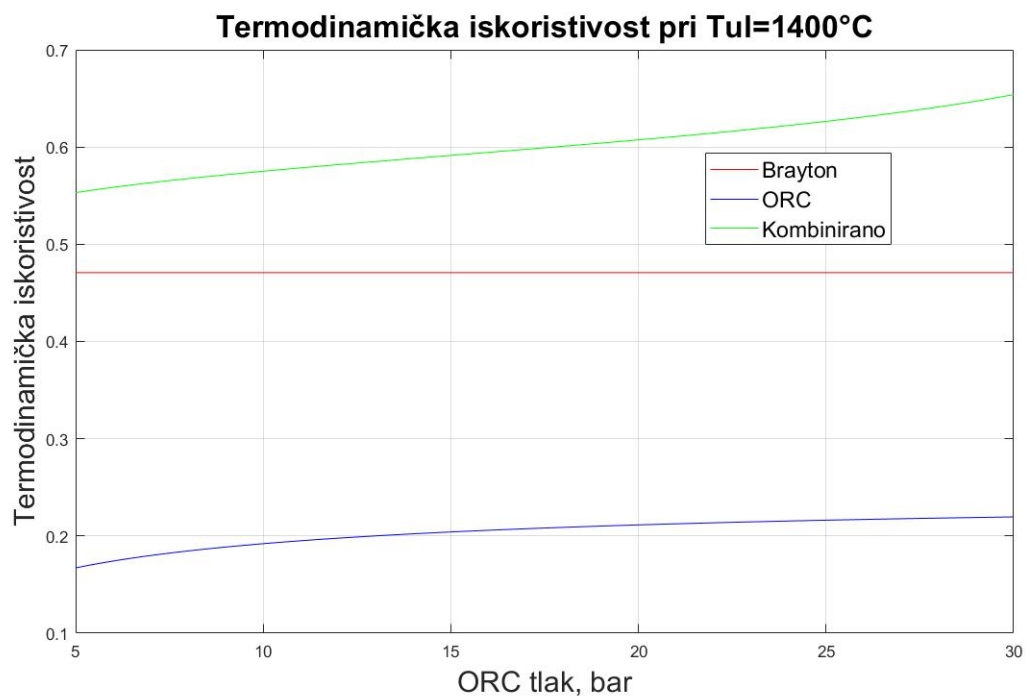
Slika 35. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan)



Slika 36. Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnom tlaku u ORC-u (cikloheksan)

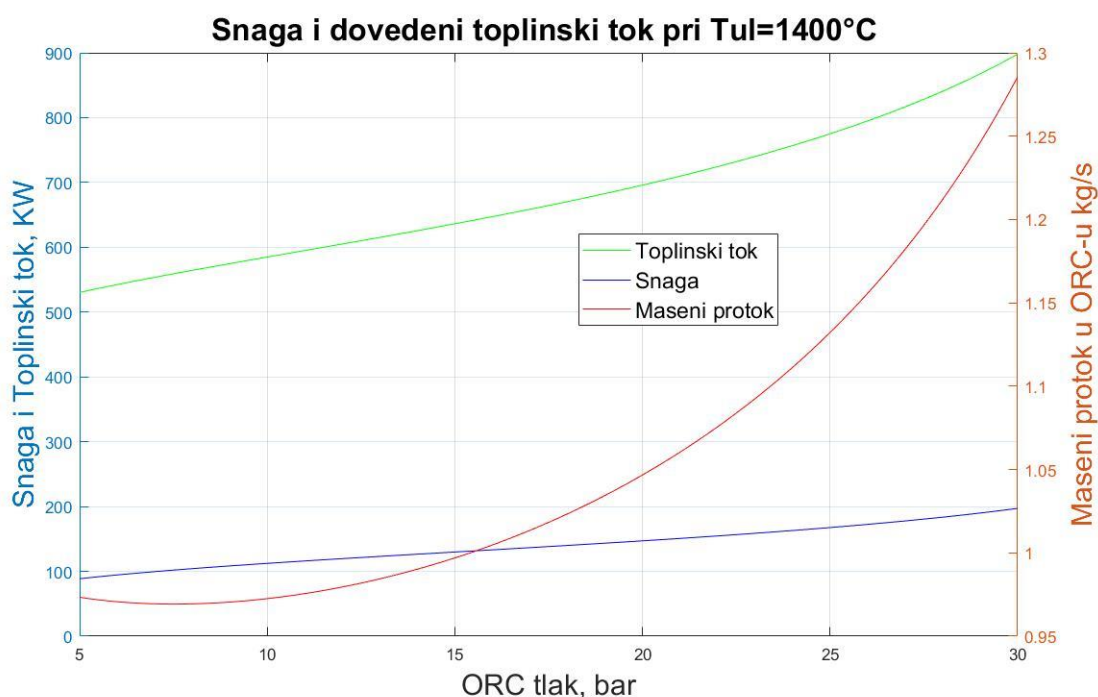


Slika 37. Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (cikloheksan)

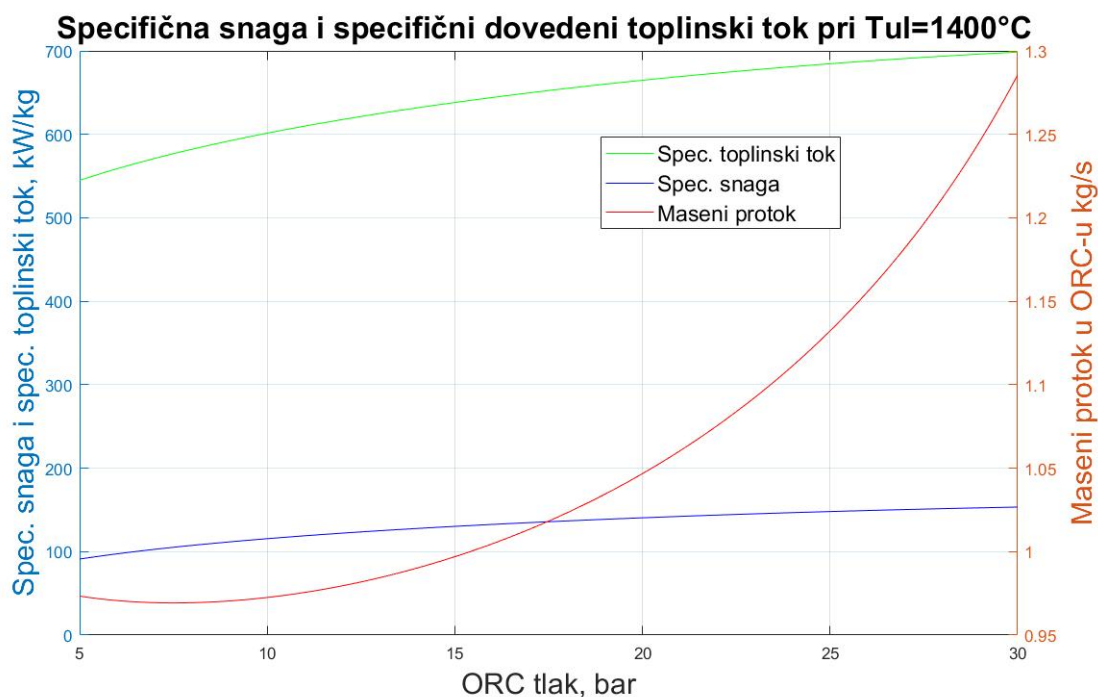


Slika 38. Ovisnost termodinamičkih iskoristivosti o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan)

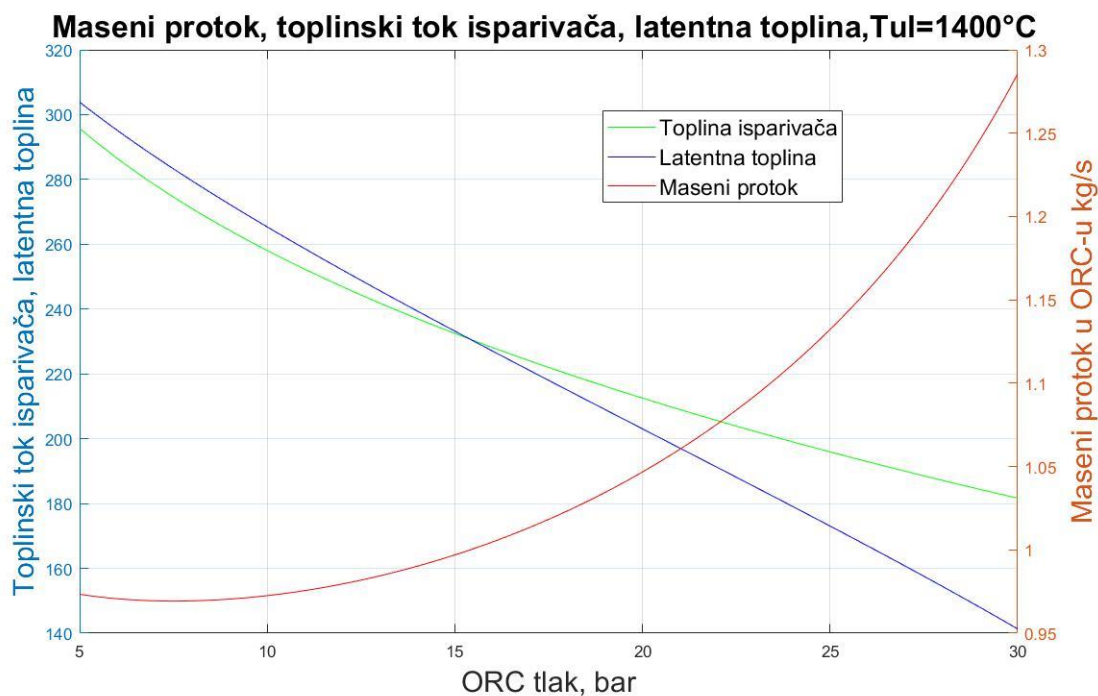
Na slici 38 prikazana je ovisnost termodinamičke iskoristivosti Braytonovog, ORC i kombiniranog ciklusa o  $p_{ORC}$  pri temperaturi na ulazu u plinsku turbinu  $T_{ul}$  1400 °C. Vidljivo je kako  $\eta_{Kombi}$  pri  $T_{ul}=1400$  °C doseže čak 65 % za tlak  $p_{ORC}=30$  bar. Može se zaključiti da cikloheksan postiže najveću termodinamičku iskoristivost kombiniranog postrojenja  $\eta_{Kombi}$  u usporedbi s acetonom i tolueonom. Iz dijagrama na slici 39 vidljivo je kako se snaga, toplinski tok i maseni protok ORC-a ponašaju vrlo slično kao i kada je aceton radni medij. To se može zaključiti i iz dijagrama na slikama 40 i 41 gdje su prikazane ovisnosti masenog protoka, specifičnog toplinskog toka, specifične snage, toplinskog toka isparivača i latentne topline u ovisnosti u  $p_{ORC}$ .



**Slika 39. Ovisnost snage, toplinskog toka i masenog protoka o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan)**

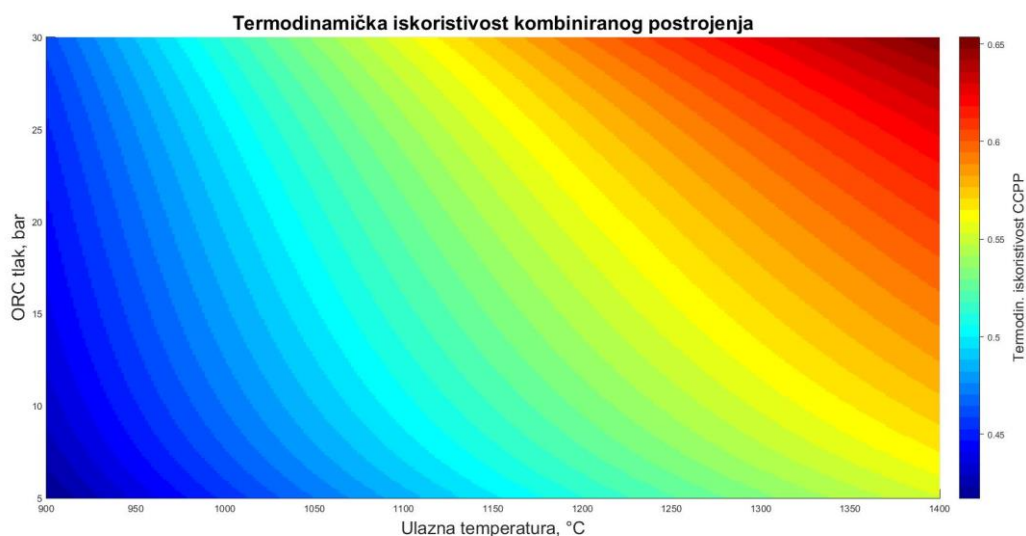


**Slika 40.** Ovisnost spec. snage, spec. toplinskog toka i masenog protoka o radnome tlaku u ORC-u (cikloheksan)



**Slika 41.** Ovisnost masenog protoka, toplinskog toka isparivača i latentne topline o radnom tlaku ORC-a (cikloheksan)



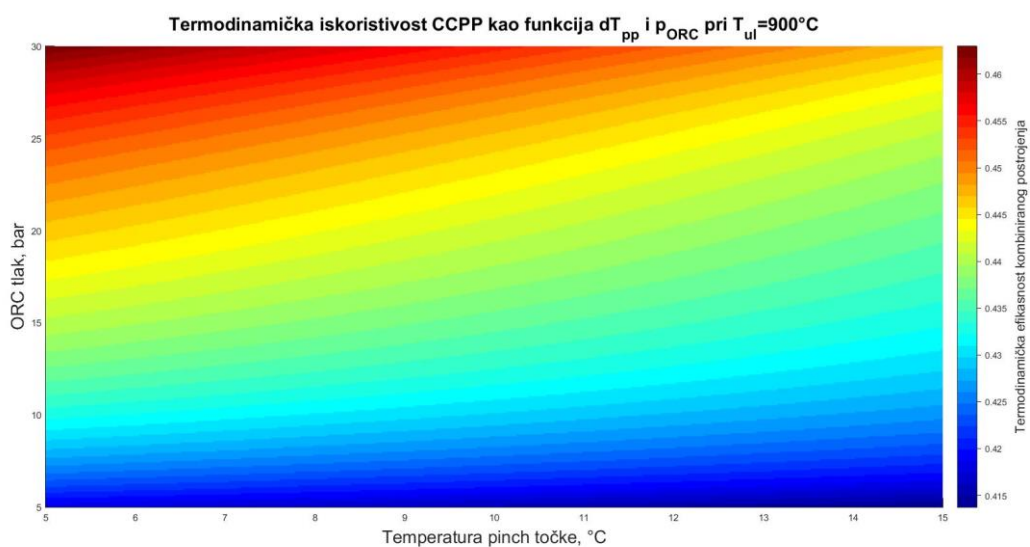


**Slika 42. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi na ulazu u plinsku turbinu Braytonovog ciklusa (cikloheksan)**

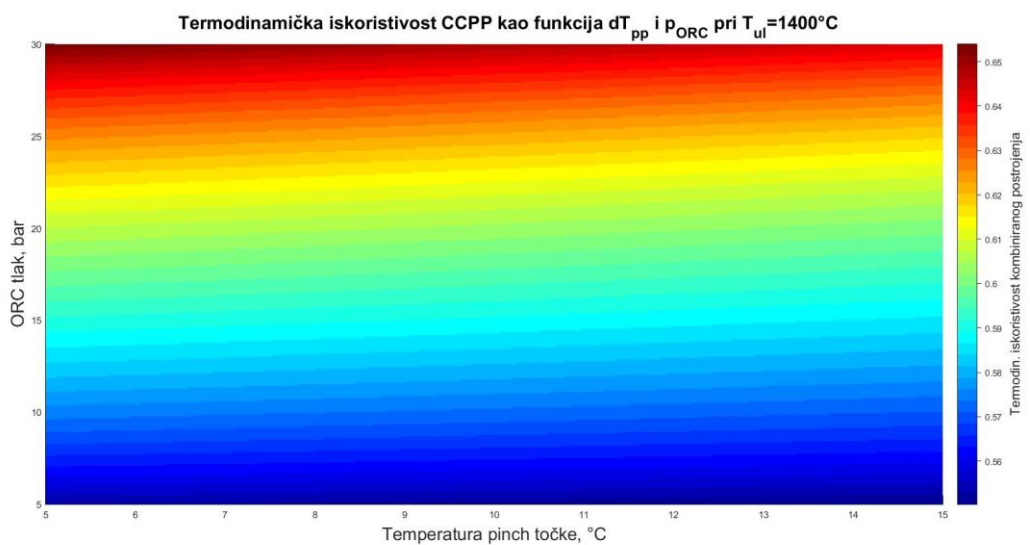
Dijagram na slici 42 prikazuje ovisnosti  $\eta_{Kombi}$  o radnome tlaku  $p_{ORC}$  i ulaznoj temperaturi u plinsku turbinu  $T_{ul}$ . Iz ovog dijagrama jasno je prikazano kako  $\eta_{Kombi}$  doseže 65 % kada je cikloheksan radni medij u ORC-u.

Dijagramima na slikama 43. i 44. prikazane su ovisnosti termodinamičke iskoristivosti kombiniranog postrojenja o  $p_{ORC}$  i temperaturi pinch točke u isparivaču. Prvi dijagram prikazuje ovisnost pri temperaturi  $T_{ul}=900$  °C, a drugi  $T_{ul}=1400$  °C. Iz oba dijagrama je vidljivo kako termodinamička iskoristivost  $\eta_{Kombi}$  je najviša pri višim tlakovima  $p_{ORC}$  i nižom temperaturom pinch točke. Ponašanje  $\eta_{Kombi}$  vrlo je slična za slučaj kada je radni medij aceton, no cikloheksan postiže višu  $\eta_{Kombi}$ .





**Slika 43. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (cikloheksan)**



**Slika 44. Termodinamička iskoristivost kombiniranog postrojenja u ovisnosti o radnom tlaku ORC-a i temperaturi pinch točke u isparivaču (cikloheksan)**

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu modelirano je kombinirano postrojenje koje se sastoji od Braytonovog plinsko-turbinskog ciklusa i ORC parno-turbinskog ciklusa. Simulacija je provedena za tri organske tvari: toluen, aceton i cikloheksan. Rezultati simulacije prikazuju kako različite organske tvari kao radni mediji u ORC-u se ponašaju pri promjeni parametara:

- Tlaka u ORC-u  $p_{ORC}$
- Temperature na ulazu u plinsku turbinu u Braytonovom ciklusu  $T_{ul}$
- Temperature pinch točke u isparivaču  $\Delta T_{pp}$

Pri temperaturi  $T_{ul}=1400$  °C, cikloheksan pokazuje najvišu termodinamičku iskoristivost kombiniranog postrojenja od 65 % pri tlaku  $p_{ORC}$  od 30 bar. Za istu temperaturu i  $p_{ORC}=30$  bar,  $\eta_{Kombi}$  za toluen iznosi 63 % a za aceton 60 %. Kada je temperatura  $T_{ul}=900$  °C, cikloheksan također ima najvišu  $\eta_{Kombi}$  koja iznosi oko 46 % pri tlaku  $p_{ORC}$  30 bar, dok za aceton iznosi 43 %. Toluen kao radna tvar u ORC-u pri temperaturi  $T_{ul}=900$  °C najvišu termodinamičku iskoristivost ima za tlak  $p_{ORC}$  od 10 bar.

## LITERATURA

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle)
- [2] Andrijević S.: Diplomski rad, Zagreb, 2015.
- [3] Bogdan, Ž.: Termoenergetska postrojenja, Zagreb, 2012.
- [4] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Termoelektrane>
- [5] Galović A.: Termodinamika I, Zagreb, 2008.
- [6] <https://www.calnetix.com/access-energy-thermapower-orc-systems>
- [7] [http://file.scirp.org/Html/4-6401034\\_3326.htm](http://file.scirp.org/Html/4-6401034_3326.htm)
- [8] <http://studenttimes.fesb.unist.hr/razvojno-istrazivacki-projekt-sigurnija-i-ucinkovitija-kogeneracijska-trigeneracijska-postrojenja/>
- [9] Qiu G.: Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC, 2012.
- [10] <http://www.enciklopedija.hr/>
- [11] [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-ignition-temperatures-d\\_171.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-ignition-temperatures-d_171.html)

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**